

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO SOBRE DIMENSIONAMENTO DE
REFORÇO DE PILAR

JOÃO BRÍGIDO R. G. VIEIRA

ORIENTADOR: PAULO CHAVES DE R. MARTINS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS

BRASÍLIA / DF: 12/15

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO SOBRE DIMENSIONAMENTO DE
REFORÇO DE PILAR**

JOÃO BRÍGIDO R.G.VIEIRA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**PAULO CHAVES DE REZENDE MARTINS, PhD (EnC-UnB)
(ORIENTADOR)**

**ALEXANDRE DOMINGUES CAMPOS, Msc (EnC-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**MARCOS HONORATO DE OLIVEIRA, DSc (EnC-UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 08 de dezembro de 2015.

FICHA CATALOGRÁFICA

BRÍGIDO, JOÃO RIBEIRO GONÇALVES VIEIRA

Estudo sobre dimensionamento de reforço de pilar [Distrito Federal] 2015.

x, 59 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2015)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Reforço

2. Técnicas de Reforço

3. Transferência de Tensões

4. Módulo de Elasticidade Ajustado

I. ENC/FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRÍGIDO, J.R.G.V. (2015). Estudo sobre dimensionamento de reforço de pilar. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: João Brígido Ribeiro Gonçalves Vieira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo sobre dimensionamento de reforço de pilar.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

João Brígido R.G. Vieira
joao.b.r.vieira@gmail.com

Resumo

Este estudo tem como objetivo semi-automatizar as verificações de serviço, por uso do programa Excel, de reforço de pilar genérico retangular e constante ao longo do seu comprimento submetido à flexão composta reta, aplicam-se os critérios de acordo com a NBR6118:2014. Estão descritas as quatro principais técnicas de reforço atual no mercado brasileiro. A ferramenta de dimensionamento será aplicável a duas técnicas de reforço mais executadas em Brasília, encamisamento com concreto armado com aumento de seção e aplicação de resina epóxi para fixação de barras de aço externas. O estudo tem como meta também o entendimento do mecanismo de ruptura desses elementos compostos. O estudo também se propõe a investigar as verificações prescritas pela NBR 6118:2014 de serviço que se aplicam ao caso de pilares reforçados. O método de análise para calcular a transferência de tensões utilizado foi método do módulo de elasticidade ajustado para transferência diferida de tensão.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1- INTRODUÇÃO | 1 |
| 2- MATERIAIS E MÉTODOS | 4 |
| 2.1- ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO: | 4 |
| 2.2- FIXAÇÃO DE BARRAS DE AÇO EXTERNAS COM RESINA EPÓXI: | 6 |
| 2.3- CONFINAMENTO DO PILAR COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO: | 8 |
| 2.4- COLAGEM DE CHAPAS DE AÇO EXTERNAS COM RESINA EPÓXI: | 9 |
| 3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 11 |
| 3.1- ANÁLISE DE ESTABILIDADE E EFEITOS DE 1ª E 2ª ORDEM | 11 |
| 3.2- COMBINAÇÕES DE CARGA | 12 |
| 3.3- EFEITOS DIFERIDOS: | 12 |
| 3.2.1- FLUÊNCIA: | 13 |
| 3.2.2- RETRAÇÃO: | 14 |
| 3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE AJUSTADO: | 14 |
| 3.4. TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES: | 15 |
| 3.5. VERIFICAÇÕES: | 17 |
| 3.5.1- ESTADO LIMITE DE SERVIÇO: | 17 |
| 3.5.1.1. ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO: | 17 |
| 3.5.1.2. ESTADO LIMITE DE FISSURAÇÃO: | 18 |
| 3.5.1.3. ESTADO LIMITE DE TENSÃO: | 18 |
| 4. ROTEIRO DE CÁLCULO: | 20 |
| 4.1. COMPRESSÃO CENTRADA: | 20 |
| 4.1.1- ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO: | 20 |
| 4.1.2- FIXAÇÃO DE BARRA DE AÇO EXTERNAS | 24 |
| 4.2. FLEXÃO COMPOSTA RETA: | 27 |
| 4.2.1- ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO: | 27 |
| 4.2.2- FIXAÇÃO DE BARRAS DE AÇO EXTERNAS: | 31 |
| 5. ESTUDO DE CASO: | 35 |

| | |
|---------------------|----|
| 6. CONCLUSÃO: | 38 |
|---------------------|----|

Anexos

| | |
|---------------|----|
| Anexo A | 40 |
|---------------|----|

| | |
|---------------|----|
| Anexo B | 43 |
|---------------|----|

Listas de Tabelas

Página

| | |
|---|----|
| Tabela 5-1, Características do pilar e informações cronológicas..... | 33 |
| Tabela A.1 Valores do coeficiente γ_f | 39 |
| Tabela A.2 Valores do coeficiente γ_{f2} | 39 |
| Tabela A.3 Combinações últimas..... | 40 |
| Tabela A.4 Combinações de serviço..... | 41 |
| Tabela A.5 Valores da fluência e da retração em função da velocidade de endurecimento do cimento..... | 41 |
| Tabela B.1 Dados de entrada do pilar original..... | 42 |
| Tabela B.2 Dados de entrada do reforço..... | 42 |

Listas de Figuras

Página

| | |
|--|----|
| ▪ Figura 1.1.1 Disposição da armadura de reforço..... | 5 |
| ▪ Figura 1.1.1 Detalhe da concretagem do topo do pilar..... | 6 |
| ▪ Figura 1.2.1 Ferragem inserida nas moças cavadas na superfície do pilar..... | 7 |
| ▪ Figura 1.2.2 Aplicação da resina envolvendo totalmente a circunferência da ferragem..... | 8 |
| ▪ Figura 1.3.1 Sistema de polímero reforçado com fibra de carbono..... | 9 |
| ▪ Figura 1.4.1 Ligação chapa metálica-pilar..... | 10 |
| ▪ Figura 3.4.1-Cronologia das cargas e do reforço da peça..... | 15 |
| ▪ Figura 3.4.2- Deformação fictícia e esforços correspondentes..... | 16 |
| ▪ Figura 3.4.3- Conjunto pilar reforço solicitado pelos esforços correspondentes, resultando no aumento de deformação..... | 16 |
| ▪ Figura 3.4.4- Diferença do aumento de deformação e da deformação livre fictícia..... | 17 |
| ▪ Figura-3.5.1.3.1 Domínios de estado limite último de uma seção transversal..... | 18 |
| ▪ Figura 3.5.1.3.2 Diagrama de tensões no estágio II..... | 19 |
| ▪ Figura 5.1 Seção acrescida do pilar..... | 35 |
| ▪ Figura B 1 Tabela de efeitos diferidos, pilar original e reforço..... | 44 |
| ▪ Figura B 2 Tabela de caracterização da seção, pilar e reforço..... | 53 |

| | |
|--|----|
| ▪ Figura B 3 Tabela de estado de deformação e tensão, pilar e reforço..... | 54 |
|--|----|

Listas de Símbolos

- ΣF_q – somatório das demais ações variáveis
- E^* - módulo elasticidade ajustado
- E_{cs} – módulo de elasticidade do concreto
- E_{ref} - módulo de elasticidade do material de referência na homogeneização da seção
- $F_{d,ser}$ – combinação de carga quase permanente
- F_d – combinação de carga última normal
- F_g – ações permanentes diretas
- F_{q1} – ação variável principal
- F_ε - ações permanentes indiretas
- H_{tot} – altura da edificação
- I_c – rigidez
- M_0 – momento fletor inicial
- M_A - maior momento de 1ª ordem
- M_B - menor momento de 1ª ordem
- $M_{Rd,x}$ - momento resistente de cálculo em flexão oblíqua composta
- $M_{Rd,xx}$ - momento resistente de cálculo em flexão composta normal
- $M_{Rd,y}$ - momento resistente de cálculo em flexão oblíqua composta
- $M_{Rd,yy}$ - momento resistente de cálculo em flexão composta normal
- N_0 – força normal inicial
- N_k – somatório das cargas verticais
- e_1 – excentricidade de 1ª ordem
- f_c – resistência do concreto à compressão
- l_0 - distância entre as faces internas dos elementos estruturais horizontais que vinculam o pilar
- α_1 – limite do parâmetro de instabilidade
- β_d - coeficiente relativo à deformação lenta reversível
- β_f - coeficiente relativo a deformação lenta irreversível
- β_s - coeficiente relativo a retração
- ε_0 – deformação inicial
- ε_L - deformação livre
- ε_{cs} - retração específica
- λ_1 – limite da esbeltez

σ_0 – tensão inicial

φ_a - coeficiente de deformação rápida

φ_d - coeficiente de deformação lenta reversível

φ_f - coeficiente de deformação lenta irreversível

ψ_0 – curvatura inicial

ψ_L - curvatura livre

h - altura da seção transversal do pilar

w_k - limites da abertura máxima característica das fissuras

α – parâmetro de instabilidade

$\Delta\varepsilon$ – variação da deformação

$\Delta\sigma$ – variação da tensão

λ – esbeltez

A – área

B – momento estático

I – momento de inércia

i - raio de giração

l - distância entre os eixos dos elementos estruturais que vinculam pilar

n – número de andares da edificação

χ - coeficiente de envelhecimento

1- INTRODUÇÃO

Reforço estrutural é qualquer intervenção construtiva feita com o propósito de aumentar a resistência da peça estrutural ou de adequá-la às exigências de serviço de deformação, fissuração, tensão e vibração.

O projeto de reforço se faz necessário pelos seguintes fatores: correção de falhas de projeto ou de execução; aumento da capacidade portante da estrutura; recuperação da perda de capacidade portante em decorrência de acidente, desgastes ou deterioração; e modificações estruturais, como, por exemplo, o corte de uma viga por motivos arquitetônicos (Souza e Ripper 1998). Na escolha da técnica de reforço e de seu respectivo dimensionamento, deve-se levar em conta diversos fatores entre os quais o histórico do edifício, os defeitos ou novas exigências e a concepção original se destacam. Esta vasta gama de peculiaridades a serem consideradas impõe limitações à ferramenta de cálculo e a ser utilizada.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional para o cálculo do reforço e restringir-se-á a projetos cuja demanda por reforço é gerada pela resistência do concreto *in loco* não atingir o valor mínimo especificado no projeto estrutural.

Tal objetivo exige conhecimento de três fatores que regem a formulação do dimensionamento: 1- as propriedades dos materiais que compõem a peça, 2- a maneira como os elementos isolados se comportam em conjunto e 3- os requisitos impostos pela NBR 6118:2014 para seu funcionamento adequado.

Frequentemente subestimados como parâmetros constantes, de determinação simplória e na maioria das vezes consideradas como dados iniciais das questões propostas, as propriedades dos materiais e a constatação dos seus valores efetivos empregados na situação em questão são um dos principais desafios do problema apresentado. Portanto, faz-se necessário um desenvolvimento mais cauteloso da formulação desses parâmetros cuja base teórica e metodologia de cálculo serão fundamentadas na tradução livre da apostila da Escola Politécnica Federal de Lausanne “EFEITOS DIFERIDOS” dos professores Milan Koprna e Renaud Favre de 1986 realizada pelo professor Paulo Chaves de R. Martins em 2014 (Koprna e Lavre, 1986). Esse fascículo trata dos conceitos fundamentais da reologia do concreto, retração e fluência, e das suas aplicações na avaliação de transferência diferidas de tensões entre os componentes do reforço e do pilar original com o auxílio do módulo de elasticidade ajustado.

O segundo fator se fundamentará na compreensão das técnicas de execução da peça de pilar reforçado, na caracterização do mecanismo de ligação dos elementos que o compõem e da cooperação entre esses elementos quando submetidos a esforços. Limitar-se-á às práticas

empregadas atualmente no mercado de Brasília. Com base em informação obtida junto à Kali Engenharia¹, fez-se o levantamento das técnicas de reforço de pilares mais utilizadas em Brasília delimitando este estudo às quatro mais recorrentes, que são: encamisamento de concreto armado com aumento de seção, aplicação de resina epóxi para fixação de barras de aço externas, confinamento do pilar com manta de fibra de carbono, e colagem de chapas de aço externas com resina epóxi

As exigências feitas pela norma brasileira de projeto de estruturas de concreto (NBR 6118:2014) para o dimensionamento de pilares serão apresentadas, proporcionando esclarecimento das condições que devem ser atendidas para propiciar um projeto de qualidade no estado limite de serviço, usualmente negligenciado no dimensionamento de reforço de pilares. Não será feita nenhuma consideração para o estado limite de ruptura, pois nesse estado pode-se desconsiderar a transferência de tensões tendo em vista que todos os componentes estão trabalhando em máxima tensão, tornando o dimensionamento pelos softwares de mercado efetivos.

A meta traçada para a ferramenta de cálculo, a ser desenvolvida em planilha do *software* Excel para o projeto final 2, é proporcionar um programa de fácil manuseio que verifique a conformidade com as exigências de serviço de um reforço de pilar genérico retangular e constante ao longo do seu comprimento submetido à flexão composta reta. Para tais pilares, aplicam-se os critérios de serviço da NBR6118:2014. Por fim, o dimensionamento preciso será comprovado pela comparação do resultado de um memorial de cálculo de reforço de pilar realizado por profissional do mercado – mantido o anonimato - com o dimensionamento efetuado através da planilha.

A justificativa do presente estudo reside na carência de entendimento da operação do sistema núcleo reforço durante o serviço da peça e das tensões atuantes nos elementos isolados do núcleo fortificado e do reforço. O uso da ferramenta a ser desenvolvida propiciará a determinação da redistribuição das tensões nessas seções fortificadas quando submetidas aos esforços provenientes da combinação de serviço em idades distintas, uma vez que o tempo é um fator determinante da redistribuição de tensões, e deve ser atrelado a outra que supre o dimensionamento de seções de reforço adequadas as exigências de ruptura. A partir da

¹ Agradeço a colaboração do engenheiro Renato Salles Cortopassi da Kali Engenharia

configuração de esforços atuantes na seção verificar-se-á a conformidade da peça reforçada perante as exigências de serviço da norma de projeto de estruturas de concreto.

2- MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico é dedicado à apresentação das técnicas e materiais de reparo mais aplicados no mercado brasileiro. Conforme consta na introdução limita-se este estudo a quatro práticas: 1- Encamisamento com concreto armado com aumento de seção, 2- Aplicação de resina epóxi para fixação de barras de aço externas, 3- Confinamento do pilar com manta de fibra de carbono e 4- Colagem de chapas de aço externas com resina epóxi. Das quatro técnicas apenas duas, 1 e 2, serão contempladas pela ferramenta computacional a ser desenvolvida para o dimensionamento do reforço, pois, além de serem amplamente empregadas, possuem mecanismo de funcionamento similar e materiais construtivos comuns.

Ao longo do trabalho não serão abordados o diagnóstico e o escoramento da estrutura para a execução do reforço, focando o projeto em pilares cuja necessidade de reforço foi identificada e a estrutura encontra-se devidamente escorada, garantindo a execução do reforço em segurança. Contudo, considerar-se-á no dimensionamento a carga de serviço permanente durante todo o tempo sem que ocorra escoramento total. A condição ideal seria a estrutura descarregada no período no qual o reforço é executado sendo recarregada somente após a retirada do escoramento. Todavia, exigir isso na execução seria um equívoco, pois estruturas provisórias capazes de absorver cargas provenientes de vários pavimentos e de transmiti-las adequadamente para o elemento de sustentação permanente situado imediatamente abaixo do pilar em questão são inviáveis do ponto de vista econômico (Souza e Ripper, 1998).

Após a ocorrência dos fatos, diagnóstico e escoramento, previamente citados é observado um padrão na ação de fortificar o pilar, técnicas e procedimentos de execução análogos que procuram assegurar a compatibilização e a continuidade no comportamento estrutural entre os elementos do pilar e do reforço, a falha ao compatibilizar o material original e o novo é principal problema de reforços (Bulletin 17, FIB). Agrupando-se os procedimentos de execução em 4 etapas: tratamento e limpeza do substrato, inserção de elemento de reforço, aplicação do elemento de ligação e execução da camada de proteção. Os sub-itens que seguem são destinados a detalhar a aplicação do reforço fracionando a execução nas quatro etapas citadas.

2.1- ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO:

O preparo do substrato ocorre pela escarificação do pilar até a exposição da ferragem original, obtendo-se uma superfície rugosa conforme mostra a figura 2.1.1. Seguida da limpeza da futura junta seca entre os elementos com jatos d'água ou de ar comprimido visando a remoção de partículas e material pulverulento com o intuito de aumentar a interação entre o

material antigo e o recente. Essa interação é essencial pois assegura a premissa de cálculo do impedimento dos efeitos diferidos isolados dos elementos, tema que tornará a ser abordado no sub-item 3.1.

Concluído o tratamento do substrato, deve-se inserir no local a armadura determinada em projeto, garantindo-se sua perfeita ancoragem. Dentre as técnicas de ancoragem pós concretagem para chumbadores de barras comprimidas o embutimento deve ter aproximadamente igual ao 40% do cobrimento de ancoragem da armadura de reforço (Souza e Ripper, 1998), destaca-se entre os tipos de adesão da barra, a adesão química pelo uso de resina epóxi. A ferragem deve ser ancorada nos elementos superiores e inferiores daquele lance do pilar. Essa fixação é feita por furos executados por perfuratrizes rotativas manuais com diâmetro pelo menos 1 cm maior que o diâmetro da barra a ancorar. Os furos devem receber o mesmo tratamento de limpeza do substrato na etapa anterior e devem ser totalmente preenchidos por resina epóxi imediatamente antes da introdução da barra de aço, que expulsará o material excedente (norma DNIT 082/2006). Essas barras devem distar do núcleo o cobrimento mínimo de 2 cm, além do cobrimento nominal com o meio externo. Após a instalação da armadura longitudinal são dispostos os estribos. Nessa disposição física dos elementos fica evidente que o acréscimo mínimo de dimensão para a execução dessa técnica é da ordem de 6 cm em cada face do pilar, 4cm de cobrimento interno e externo somados às bitolas do ferro longitudinal e do estribo.



Figura 2.1.1 Disposição da armadura de reforço (fonte: ADC Projetos).

No aumento de seção, o concreto é responsável por parte da resistência da peça, ligação entre o reforço e o núcleo e pela proteção da armadura. Portanto, as recomendações construtivas proposta na literatura são diferentes das exigidas pela norma (NBR 6118:2014), por serem mais rigorosas com o intuito de minimizar as chances de patologias, o que seria absurdo em obras de reforço.

O lançamento do concreto para encamisamento deve ter altura de queda máxima de 1,1 m. O tempo de desmolde para a concretagem do segmento seguinte é de 48 h e é recomendada utilização de aditivos desformantes. A boa prática pede que a concretagem do último segmento seja feita por furos no elemento superior com vedação completa da forma do segmento do reforço e que este último segmento tenha no máximo 30 cm, caso isso não seja possível, deve-se encunhar argamassa seca no topo, limitando a altura do segmento final a 8 cm, ver figura 2.1.2. O tempo de cura é essencial como será evidenciado na etapa de cálculo e deve ser seguido à risca. O elemento deve ser mantido saturado por, no mínimo, 7 dias, reduzindo a retração no elemento do reforço, começando no ato da concretagem. É recomendado também evitar radiação solar nas primeiras 36h também devida a retração. A forma deve ser mantida por, no mínimo, 28 dias, submetendo o elemento de concreto a cargas somente em idade adequada amenizando o efeito da fluência no concreto recente. A consequência dessa espera também será abordada em etapas seguintes.

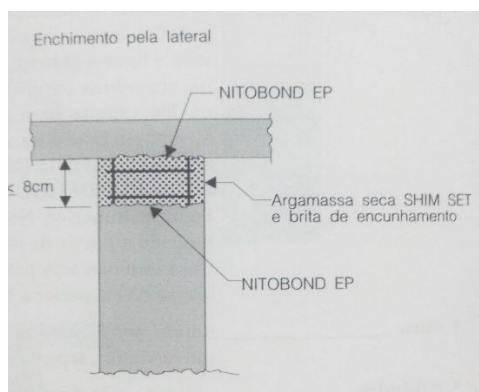


Figura 2.1.2 Detalhe da concretagem do topo do pilar (Helene, 1992)

2.2- FIXAÇÃO DE BARRAS DE AÇO EXTERNAS COM RESINA EPÓXI:

O tratamento dado ao pilar original é similar ao descrito no encamisamento, mas existem diferenças. A principal delas é a função da escarificação. Nessa técnica ela tem o intuito de cavar mossas para a fixação das novas barras de aço no núcleo, o que faz desta aplicação menos destrutiva que a anterior, as mossas devem ser significativamente maiores do que a barra pois essa precisa ser totalmente envolta com resina, conforme descrito a seguir e na figura 2.2.1.

A fixação das barras é feita por furos nos elementos superiores e inferiores de cada lance do pilar a ser reforçado, idêntico ao primeiro procedimento. A proteção e a aderência ao elemento original da área de aço são proporcionadas pela resina epóxi e pelos grampos, conforme ilustrado nas figuras 2.2.1 e 2.2.2. A resina deve ser aplicada em toda a circunferência das barras em toda a sua extensão, preenchendo também o espaço entre as moças cavadas no núcleo e a barra. Somente após esse preenchimento é que se deve iniciar o grampeamento. O grampeamento das barras tem a mesma função do estribo dos pilares convencionais, estabilidade lateral contra a flambagem das barras, e deve ser distribuído de acordo com o projeto estrutural do reforço.

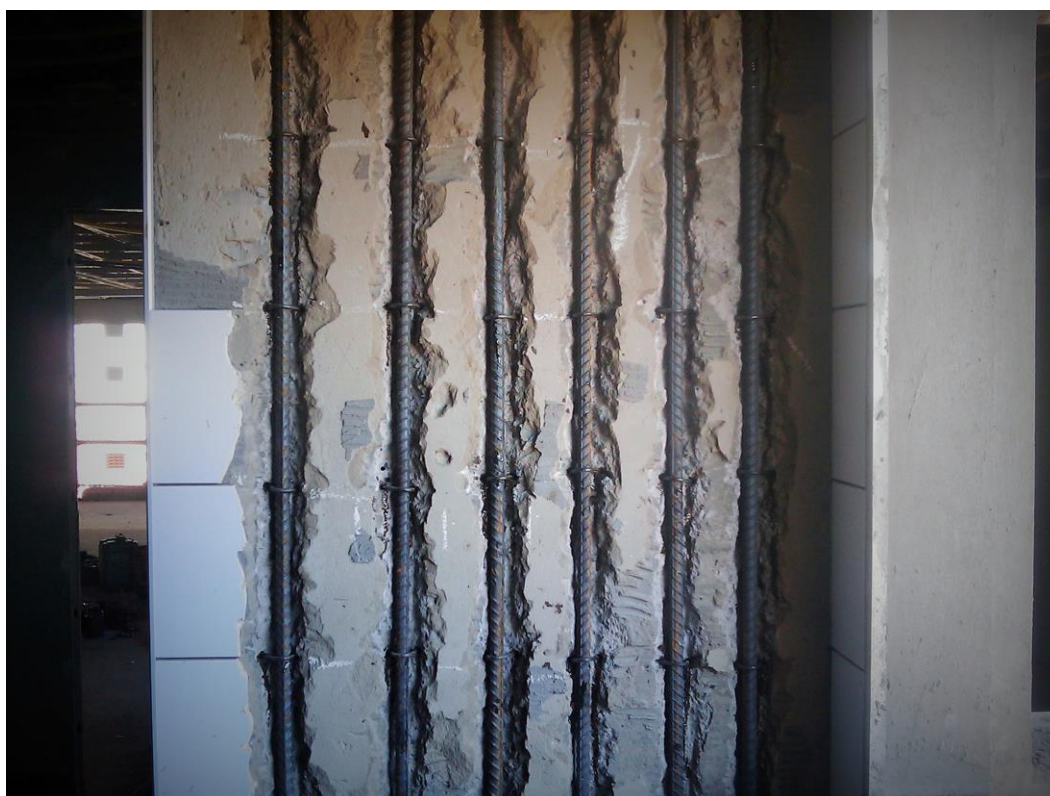


Figura 2.2.1 Ferragem inserida nas moças cavadas na superfície do pilar (fonte: ADC Projetos)



Figura 2.2.2 Aplicação da resina envolvendo totalmente a circunferência da ferragem
(fonte:ADC Projetos)

Concluídas essas etapas é feito o acabamento de véis estético visando também a proteção do grampo. Esse segundo objeto pode ser atingido de maneira mais localizada, com o uso de argamassa caso a aparência lisa do pilar não seja fundamental. O somatório das dimensões dos componentes de reforço proporciona um aumento da seção de, aproximadamente, 2 cm por face, porém, esse acréscimo não representa um ganho de resistência, o incremento efetivo de seção resistente é apenas a área de aço.

2.3- CONFINAMENTO DO PILAR COM MANTA DE FIBRA DE CABORNO:

A preparação do substrato requer mais cautela do que nas práticas descritas até então pois a aderência é a característica essencial para o funcionamento do reforço e no presente caso ela é proporcionada apenas pelas finas camadas de resinas de origem epóxi responsáveis pela ligação do núcleo com o polímero reforçado com fibra de carbono.

É necessário obter uma superfície de concreto plana e rugosa. Para tal se remove a pintura e camada superficial de nata de cimento e caso ocorram cavidades ou falhas essas devem

ser preenchidas com argamassa epóxi, também é recomendado o arredondamento das quinas do pilar com o auxílio de esmerilhadeira até que se apresente raio de curvatura da ordem de 3mm (Souza e Ripper, 1998).

Após a conclusão do preparo da superfície, pode-se dar continuidade execução pela aplicação do primer esperando aproximadamente uma hora para a aplicação das demais camadas seguindo a ordem ilustrada na figura 2.3.1: resina de origem epóxi, manta flexível de fibras de carbono, camada final de cobrimento das fibras e, por fim, o acabamento em pintura protetora. Grande vantagem deste método é a ampliação mínima das dimensões do elemento estrutural, facilitando o ocultamento do reforço.

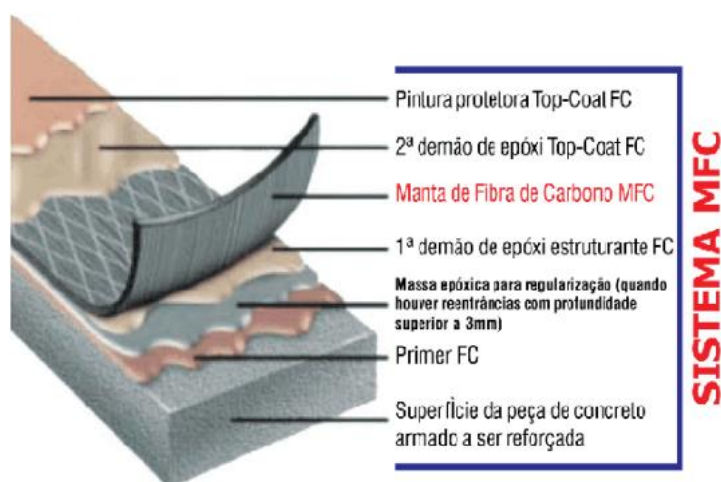


Figura 2.3.1 Sistema de polímero reforçado com fibra de carbono (Rogertec, 2006)

Para o reforço de pilar, são aplicadas 2 camadas de mantas, sendo essas separadas por uma aplicação de resina, perpendiculares uma a outra e alinhadas com eixo do pilar combatendo o momento fletor, fibras verticais, e o esforço cortante, fibras transversais. O acréscimo de resistência a compressão é proporcionado pelo confinamento do concreto envolto nas mantas, esse ganho do concreto no estado multiaxial de tensões pode ser de até quatro vezes a resistência a tração do material (NBR6118:2014, item 8.6.2)

2.4- COLAGEM DE CHAPAS DE AÇO EXTERNAS COM RESINA EPÓXI:

A intervenção no substrato é igual a apresentada no sub-item anterior dispensando o arredondamento das quinas. O adesivo deve ser aplicado instantes antes da fixação das chapas metálicas que tem sua área de contato tratada com jato de areia ou lixa elétrica 2h antes a colagem (Helene,1992). É comum que se exija em projeto abas sobressalentes às chapas para melhorar o aperto entre elas com o auxílio de parafusos e porcas transpassando-as, ver figura 2.4.1.

Executar o aperto das chapas de aço com auxílio de caibros e escoras, pressionando fortemente contra o núcleo apertando as porcas nas ligações entre elas. A proteção contra oxidação pode ser feita apenas por pintura adequada e por questões de estética e comodidade deve ser feita a remoção do excesso do adesivo antes do endurecimento. Para garantir a fixação das chapas, o escoramento é mantido por 48h, propiciando tempo suficiente para a ação do adesivo.

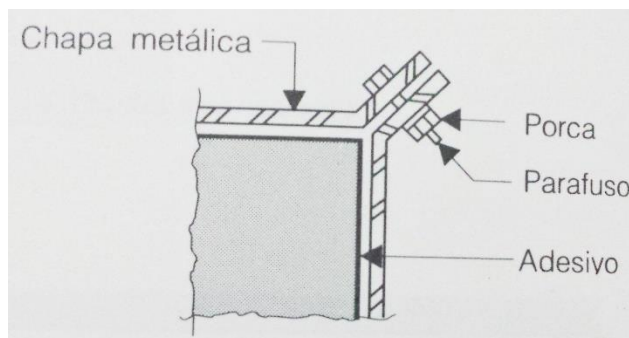


Figura 2.4.1 Ligação chapa metálica-pilar (Helene,1992)

O aperto das chapas deve reduzir a camada da resina a ordem de 1,5cm, camada fina, menores que 2 cm reduzem o risco de defeito no adesivo (Bulletin 17 FIB). Somando a espessura da chapa, limitada a 4 cm (Helene e Pereira, 2003), à camada de adesivo obtém-se acréscimo de seção da ordem de 5 a 6cm por face da peça reforçada.

3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Como explicitado na introdução, o intuito deste estudo é realizar o cálculo de uma estrutura de reforço conforme a NBR 6118:2014, realizando no seu dimensionamento as devidas verificações. O método do módulo de elasticidade ajustado será aplicado para a determinação da redistribuição de tensões nos elementos das peças reforçadas, demandando conceitos e formulações que o presente capítulo reproduz.

O método de cálculo das transferências de tensões, proposto no sub-item 3.4 e exemplificado no roteiro de cálculo do item 4, atende as três principais considerações para o redimensionamento de estruturas de concreto com reforço (Bulletin 17, FIB):

1. A estrutura final é composta pelo material original com seu estado de esforços e tensões internos atuando complementado pela nova estrutura do reforço.
2. A estrutura reforçada deve ser analisada como um composto estrutural levando em consideração a sequência de aplicação do reforço e os efeitos das combinações das diferentes propriedades do concreto antigo e recente tanto no estado limite de serviço, como no estado limite último.
3. A transferência interna de esforços ao longo da junta entre os materiais deve ser analisada com cuidado para garantir que a estrutura reforçada atue como elementos homogêneos. O que pode ser assegurado pela introdução de conectores na junta entre os materiais. A junta deve ser executada de maneira que nenhum movimento seja permitido durante a transferência de esforços.

3.1- ANÁLISE DE ESTABILIDADE E EFEITOS DE 1ª E 2ª ORDEM

Efeitos de 1ª ordem são oriundos da análise indeformada da estrutura submetida aos esforços provenientes das combinações de cargas previstas na seção 11.8 da norma brasileira.

Efeitos de 2ª ordem são aqueles obtidos pela análise do equilíbrio considerando a configuração deformada da estrutura e devem ser somados aos de 1ª ordem, estrutura indeformada. São divididos em efeitos globais de 2ª ordem, analisando o deslocamento da estrutura como um todo; e efeitos locais de 2ª ordem, analisando o deslocamento da peça em questão.

Limitar-se-á a ferramenta de cálculo à análise e dimensionamento de seções de concreto armado, portanto, a competência de terminar as solicitações críticas da peça a ser dimensionada é exclusiva do usuário do *software*.

3.2- COMBINAÇÕES DE CARGA

A definição de carregamento pela NBR 6118:2014 é “combinação de ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período preestabelecido. ”. Duas combinações de cargas são importantes para o dimensionamento do reforço. A combinação última normal (F_d), compreende ações permanentes, ações permanentes diretas (F_g) e ações permanentes indiretas (F_{ϵ}); ação variável principal (F_{q1}) e as demais ações variáveis ($\sum F_q$), atreladas aos seus respectivos coeficientes que ponderam a probabilidade das ações atuarem simultaneamente. E a combinação de cargas quase permanentes ($F_{d,ser}$), composta pelas cargas permanentes diretas (F_g) e das ações variáveis (F_q) minoradas de um coeficiente análogo à combinação última normal. As tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 para a determinação das combinações de carga e seus coeficientes constam no Anexo A.

As cargas permanentes são constituídas pelo peso próprio da estrutura e pelo peso de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes e as cargas variáveis, ou acidentais, são todas as que podem atuar sobre a estrutura em função do seu uso (NBR 6120:1980).

É importante salientar que esses são coeficientes para projeto de edifícios, idealizados para proporcionar segurança na determinação de carregamentos futuros, mas no caso do dimensionamento de reforço a edificação, ou parte dela, já está executada e muitas vezes é possível ter maior certeza das cargas atuantes, principalmente para a combinação de cargas quase permanentes. Portanto, uma das tarefas do dimensionamento é considerar possíveis reduções nos coeficientes de segurança pelo uso de informações que eliminem parte da incerteza (Bulletin 17, FIB).

3.3- EFEITOS DIFERIDOS:

Efeitos diferidos são aqueles que precisam da introdução da variável tempo nas suas formulações por ocorrerem de forma gradual no seu decorrer. Restringir-se-á a fluência e a retração, não abordando a relaxação do aço pois esse não terá tensões elevadas o suficiente, 0,5 a 0,8 fyd (NBR 6118/2014, item 8.3.6) para que a relaxação seja um fator determinante nos reforços de pilares de edifícios comuns.

A propriedade do concreto de se deformar sem o acréscimo de carga é o que nos proporciona um reforço efetivo de pilar, caso contrário, o reforço seria meramente decorativo e somente entraria em serviço após a ruptura do núcleo no caso de edifícios totalmente

carregado ou assumiria apenas parcelas dos esforços provenientes das cargas atuantes após sua execução naqueles parcialmente carregados.

Analisando isoladamente o elemento do reforço, no ato da remoção da forma, todo o carregamento é resistido pelo núcleo, pois já o era antes da fortificação da peça. A transferência é dada pela vinculação desses dois elementos com tendências a se deformarem de maneira distinta. O reforço que sofreria uma deformação lenta diferente e de menor velocidade que o núcleo, o que não é possível pois foram tomados os devidos cuidados para que os elementos se solidarizem durante a execução. Então, o que temos nesse conjunto são componentes com propriedades reológicas diferentes ligados, gerando entraves e transferindo tensões entre eles.

3.2.1- FLUÊNCIA:

É a variação gradual no tempo, das deformações relativas do concreto quando submetidos a tensões que perduram. Caracterizada pelo coeficiente de fluência (φ), definido como a relação entre a deformação relativa livre e a deformação inicial (Koprná e Lavre, 1986). Em virtude do envelhecimento, a fluência do concreto depende não apenas da duração do carregamento, mas também da idade na qual esse carregamento foi aplicado, quanto mais tardia a ocorrência de cargas, menor serão as deformações; devido ao módulo de elasticidade do concreto progredir com o tempo. Encontra-se aqui a justificativa para a exigência de se manter o escoramento da estrutura por no mínimo 28 dias no sub-item 2.1. Outro fator que controla não só a fluência, a retração também, é a umidade da peça, quanto mais úmido for o microclima da peça, mais tênues serão os efeitos diferidos na mesma.

Para o cálculo da fluência é usada a combinação de cargas quase permanente ($F_{d,ser}$), pela necessidade das tensões perdurarem no tempo.

Abordado no anexo A da NBR 6118:2014, o cálculo do coeficiente é dividido em três parcelas: coeficiente de deformação rápida (φ_a), coeficiente de deformação lenta irreversível (φ_f) e coeficiente de deformação lenta reversível (φ_d).

O primeiro leva em conta a razão entre a resistência no início da aplicação da tensão do concreto e sua resistência potencial no tempo infinito, o segundo depende da umidade relativa do microclima da peça, da razão da área da peça por seu perímetro exposto ao ambiente, ambas retratadas pelo valor final do coeficiente de deformação lenta irreversível ($\varphi_{f\infty}$), e do coeficiente relativo a deformação lenta irreversível ($\beta_f(t)$) no intervalo de tempo em questão; e o terceiro é atrelado à deformação lenta reversível no intervalo de tempo em que se deseja obter o coeficiente de fluência por meio do valor final do coeficiente de deformação lenta

reversível ($\varphi_{d\infty}$) e do coeficiente relativo à deformação lenta reversível em função do tempo (β_d). Configurando a seguinte expressão:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty}[\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty}\beta_d$$

3.2.2- RETRAÇÃO:

É a variação gradual no tempo do volume do concreto durante o processo de endurecimento em decorrência da saída de água dos seus poros caracterizada pela retração específica (ε_{cs}). A retração autógena é a causada pela hidratação dos grãos de cimento. Ambas são amenizadas pela realização da cura da peça de concreto pois proporciona ambiente saturado para idade inicial, quando a peça é mais suscetível a retração pois a demanda de água pelos grãos de cimento é elevada e a resistência do material a tração possui valores muito baixos. Outra intervenção comumente aplicada para atenuar a ação da retração nas idades iniciais é privar a peça da radiação UV, conforme consta no sub-item 2.1.

O cálculo da retração está no mesmo anexo A da norma e depende da umidade relativa do microclima da peça, da consistência do concreto no lançamento e da razão da área da peça por seu perímetro exposto ao ambiente além do intervalo de tempo em que se deseja obter a retração (NBR 6118:2014). Fatores englobados pela formulação proposta pela norma e explicitada abaixo:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

Onde:

$\varepsilon_{cs\infty}$ é o valor final da retração;

$\beta_s(t)$ é o coeficiente relativo a retração.

3.3. MÓDULO DE ELASTICIDADE AJUSTADO:

Esta variável será aplicada neste estudo para relacionar deformação e tensão que perdurem no tempo, tempo suficiente para que as propriedades do material em questão, no caso o concreto, sofram alterações significativas. Portanto, usar-se-á desse artifício para mensurar os efeitos da restrição aos efeitos diferidos nos elementos do reforço.

O módulo elasticidade ajustado (E^*) é obtido através da seguinte equação (Koprna e Lavre, 1986):

$$E^*(t, t_0) = \frac{E_0}{1 + \chi(t, t_0) \cdot \varphi(t, t_0)}$$

Na qual o $\varphi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência e o $\chi(t, t_0)$ é o coeficiente de envelhecimento, variável determinada experimentalmente que pode ser parametrizada em função do coeficiente de fluência:

$$\chi = \frac{1}{1 - e^{-\varphi}} - \frac{1}{\varphi}$$

3.4. TRANSFEÊNCIA DE TENSÕES:

As tensões oriundas dos efeitos diferidos só ocorrem quando temos impedimentos para as deformações da fluência ou da retração, exatamente o que ocorre quando o núcleo do pilar a ser reforçado é vinculado à estrutura de reforço, seja pela camada externa de concreto no encamisamento, seja pela resina epóxi na fixação de barras de aço externas. Para essa análise foi adotada a seguinte cronologia de eventos: 1- pilar original solicitado pela carga parcial de serviço; 2- pilar com o reforço ainda com a carga parcial e 3- pilar reforçado com toda a carga de serviço.

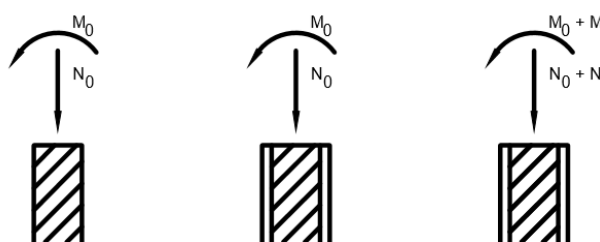


Figura 3.4.1-Cronologia das cargas e do reforço da peça

O método do modulo de elasticidade ajustado para transferência diferida de tensão entre os componentes é fundamentado na diferença da deformação fictícia dos elementos isolados que compõem a seção, no decorrer do tempo, e que a transferência de tensões ocorre pela compatibilização das deformações desses elementos, compatibilização que só ocorre devida ao vínculo dos elementos, configurando impedimentos a essas deformações fictícias.

O cálculo dessa parcela transferida é feito pelo teorema dos trabalhos virtuais, podendo ser descrito pelas seguintes etapas.

Primeiro determina-se o estado do pilar sem o reforço, suas tensões e deformações, incluindo os efeitos diferidos desde o término da cura, para a retração, e da retirada do escoramento, para a fluência, até o instante do reforço. Utiliza-se a seção de concreto para este cálculo.

Posteriormente, já com o reforço aplicado, se estabelece as deformações fictícias desde a execução do reforço até a data desejada de todos os elementos do pilar como se esses fossem

livres de quaisquer impedimentos e pelo módulo de elasticidade ajustado se obtêm as forças e momentos correspondentes a cada uma dessas deformações. Aplicamos aqui o módulo de elasticidade ajustado, pois os deslocamentos advindos dos efeitos diferidos ocorrem gradualmente no tempo, impossibilitando o uso de um valor instantâneo do módulo de elasticidade. Esses esforços correspondentes são tais que se aplicados nas seções livres, essas retornariam às suas respectivas deformações no ato do reforço.

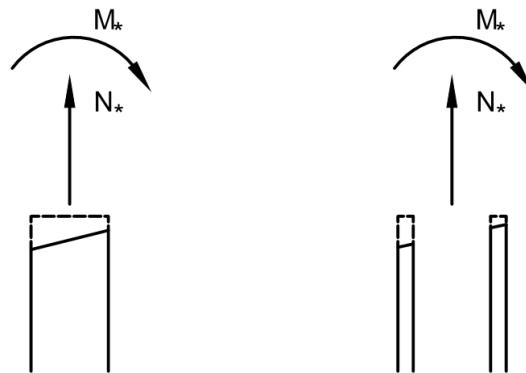


Figura 3.4.2- Deformação fictícia e esforços correspondentes

A par dos esforços correspondentes o reforço e o pilar serão tratados como um conjunto no qual atuarão todos esses esforços internamente, de forma que não se alteram as reações de apoio. Tal sistema gerará as deformações do conjunto pilar e reforço de acordo com a data escolhida.

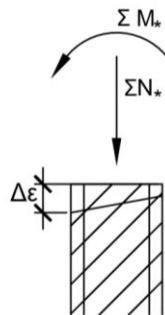


Figura 3.4.3- Conjunto pilar reforço solicitado pelos esforços correspondentes, resultando no aumento de deformação

Pela diferença entre as deformações fictícias livres e o aumento de deformação, em função do módulo de elasticidade ajustado, se obtém a transferência de tensão.



Figura 3.4.4- Diferença do aumento de deformação e da deformação livre fictícia.

3.5. VERIFICAÇÕES:

As hipóteses básicas para a análise proposta pela NBR 6118:2014 são: seções transversais se mantêm planas após a deformação; as barras de aço são aderentes ao concreto ou epóxi que as envolve; na ruptura o concreto não resiste à tração; as tensões no concreto seguem o diagrama idealizado parábola reta determinado na seção 8.2.10.1 da norma em questão; as tensões no aço seguem os diagramas definidos na seção 8.3.6 e 8.4.5 da mesma.

3.5.1- ESTADO LIMITE DE SERVIÇO:

São os requisitos específicos da edificação em condições normais de uso e ambientais (Clímaco, 2013), requisitos relacionados ao conforto dos usuários, durabilidade, aparência e a boa utilização levando em conta especificidades da edificação em questão.

3.5.1-1. ESTADO LIMITE DE DEFORMAÇÃO:

No capítulo 13.3 da norma de projeto de estrutura de concreto as deformações limites são classificadas em quatro grupos, aceitação sensorial, efeitos específicos, efeitos em elementos não estruturais e efeitos em elementos estruturais; e expressas em função do vão vencido pelo elemento alvo da verificação. Todavia elementos verticais submetidos a flexão composta oblíqua de esforço normal preponderante não possuem valores tabelados próprios, fato que, na prática, torna essa verificação dispensável nesses elementos cujas deformações são muito inferiores as vigas e lajes, para os quais esses limites foram de fato estipulados, devida a sua maior rigidez exigida no dimensionamento do estado limite último.

Assunto retomado no sub-item 17.3.2 da norma, que aborda a determinação da deformação a ser comparada com os limites estabelecidos na seção previamente citada, refere-se apenas a lajes e vigas, inibindo novamente a verificação da deformação em elementos comprimidos. Conclui-se então que pilares são isentos dessa verificação na norma brasileira.

Para garantir que o comportamento do conjunto pilar reforço atende a essa condição em serviço, a tensão de compressão máxima da fibra mais comprimida de concreto deve ser inferior à metade do f_{ck} , conforme explicitado pela norma (NBR 6118/2014):

“Para tensões de compressão menores que $0,5 f_c$, pode-se admitir uma relação linear entre tensões e deformações, adotando-se para módulo de elasticidade o valor secante dado pela expressão constante em 8.2.8”

Por tratar-se de compressão centrada e flexão composta reta, a distribuição de tensões na peça será linear, por tanto, deve-se restringir a compressão máxima da fibra ao $0,5 f_{ck}$, o que no caso de flexão composta se trata da análise da tensão na fibra da borda. Conforme ilustrado abaixo:

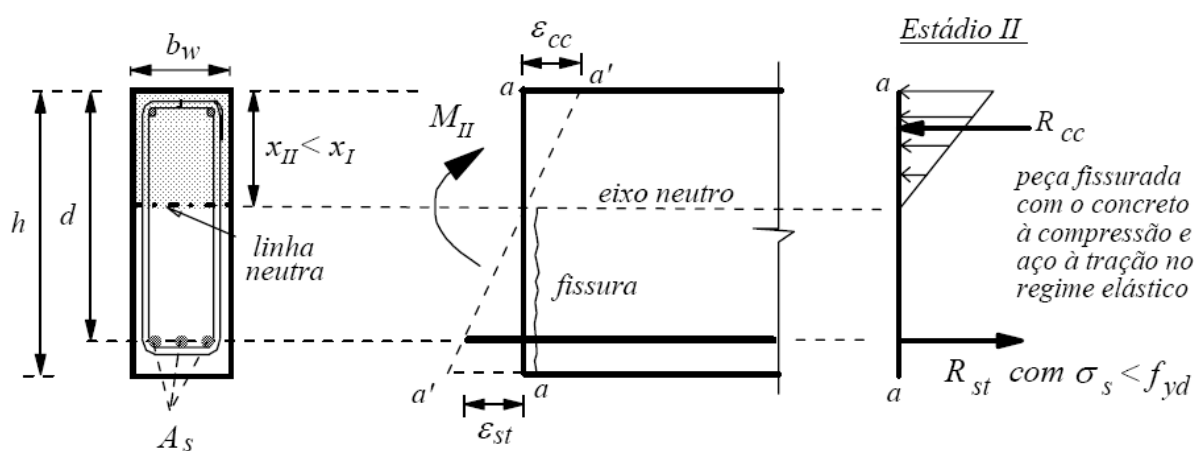


Figura 3.5.1.3.2- Diagrama de tensões no estágio II.

4. ROTEIRO DE CÁLCULO:

4.1. COMPRESSÃO CENTRADA:

4.1.1- ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO:

O roteiro de cálculo esboçado o sub-item 3.4 para descrever o mecanismo de transferência de tensão será detalhado a seguir para transferência de tensão de pilar reforçado submetido a compressão centrada. Cada valor a ser calculado será expresso em duas etapas: 1- elucidar-se-á a variável a ser determinada e 2- equação matemática utilizada para determiná-la; caso essa informação seja usada em mais de uma equação, suas informações serão descritas apenas na primeira aparição (a formulação transcrita da planilha e os valores de entrada necessário para o cálculo serão apresentados no Anexo B).

- 1- Determinar as solicitações atuantes no pilar, podem ser utilizadas combinação de cargas quase permanentes ou, como abordado no item 3.1.1, o engenheiro responsável pode utilizar outros métodos para determinar os carregamentos de forma mais precisa, para tal é recomendado o processamento da estrutura em programas especializados. Ressalta-se novamente que a determinação dos esforços atuantes na seção são encargo e responsabilidade do engenheiro estrutural e devem receber a devida cautela. Devem ser fornecidos à planilha os valores os esforços atuantes em duas condições:
 - a. Situação pré reforço (N_0), com a carga máxima que atuou desde a concretagem até a execução do reforço;
 - b. Situação pós reforço (N), carga máxima prevista para o uso da estrutura, nesse segundo caso é recomendado seguir a formulação da NBR2118/2014;
- 2- Cálculo das características reológicas do pilar original e do reforço. Determinar o coeficiente de fluência e de envelhecimento, a retração e o módulo de elasticidade ajustado na idade da execução do reforço, na retirada do escoramento do reforço e no tempo infinito:
- 3- Determinar o módulo de elasticidade do concreto em questão E_c para o concreto do pilar original e para o concreto do reforço por meio da seguinte equação do módulo de elasticidade tangente, pois trataremos apenas de tensões de serviço no concreto:

$$E_{c28} = 5600 * \sqrt{f_{ck}}$$

O módulo de elasticidade foi considerado constante a partir dos 28 dias, a favor da segurança.

- 4- Determinar a área da seção de concreto (A_1c) e em seguida a tensão (σ_0) e a deformação (ε_0) na seção crítica do pilar.

$$A_1c = b \cdot h \cdot (1 - tx)$$

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{A_1c}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_1c}$$

Onde,

tx taxa de aço do pilar;

ε_0 deformação no centro do pilar;

σ_0 tensão atuante na peça quando submetida as solicitações;

A_1c área de concreto da seção do pilar;

E_1c módulo de elasticidade do concreto do pilar original.

- 5- Determinar área da seção de concreto (A_2c) e em seguida a tensão acrescida (σ) e a deformação acrescida (ε) na seção crítica do pilar reforçado devida a carga plena.

$$A_2c = (b_r \cdot h_r - b \cdot h) \cdot (1 - tx')$$

$$\sigma = \frac{N - N_0}{A_1c + A_2c}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2c}$$

Onde,

tx' taxa de aço do reforço;

ε deformação acrescida no centro do pilar reforçado;

σ tensão atuante na peça quando submetida as solicitações;

A_2c área de concreto da seção do pilar reforçado;

E_2c módulo de elasticidade do concreto do reforço.

- 6- Determinação das parcelas influentes nas deformações (ε) na 1-idade inicial(t_0); 2-na retirada do escoramento do reforço(t_1); 3-na eminência da plena carga(t_2^-) e na sua 4-real aplicação(t_2^+) e no 5-tempo infinito(t_∞) para o pilar original ($\varepsilon_1(t)$) e o reforço ($\varepsilon_2(t)$), considerando as seções completamente associadas;

$$\varepsilon_1(t_0) = \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_1(t_1) = \varepsilon_1(t_0) + \varepsilon_L(t_1 - t_0)$$

$$\varepsilon_1(t_2^-) = \varepsilon_1(t_1) + \varepsilon_L(t_2 - t_1) + \Delta\varepsilon_1(t_2 - t_1)$$

$$\varepsilon_1(t_2^+) = \varepsilon_1(t_2^-) + \frac{\sigma}{E_1c}$$

$$\varepsilon_1(t_\infty) = \varepsilon_1(t_2^+) + \Delta\varepsilon_1(t_\infty - t_2)$$

$$\varepsilon_2(t_1) = 0$$

$$\varepsilon_2(t_2^-) = \Delta\varepsilon_2(t_2 - t_1)$$

$$\varepsilon_2(t_2^+) = \varepsilon_2(t_2^-) + \frac{\sigma}{E_1 c}$$

$$\varepsilon_2(t_\infty) = \varepsilon_2(t_2^+) + \Delta\varepsilon_2(t_\infty - t_2)$$

- 7- Determinar as deformações fictícia livres (ε_L) e as deformação fictícia travada pela execução do reforço (ε'_L):

$$\varepsilon_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_{cs}(t_1 - t_0)$$

$$\varepsilon'_L(t_2 - t_1) = \varepsilon_L(t_2 - t_0) - \varepsilon_L(t_1 - t_0)$$

- 8- Determinar os esforços correspondentes (N^*);

$$N^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot A^* \cdot \varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

Onde,

$\varepsilon'_L(t_2 - t_1)$ deformação fictícia travada pela execução do reforço que ocorreria no devido intervalo de tempo.

- 9- Determinar os aumentos de deformação devido aos efeitos diferidos ($\Delta\varepsilon$):

$$\Delta\varepsilon(t_2 - t_1) = \frac{\sum N^*(t_2 - t_1)}{E^*_{ref} \cdot A^*}$$

Onde,

A^* área homogeneizada de concreto da seção do pilar reforçado;

E^*_{ref} módulo de elasticidade ajustado do concreto usado como referência na homogeneização.

- 10- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no pilar original na data da retirada da escora do reforço, plena carga e tempo infinito:

$$\Delta\sigma_1 = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1L})$$

- 11- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no reforço do pilar nas mesmas datas:

$$\Delta\sigma_2 = E^*(t) \cdot (\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{2L})$$

- 12- Cálculo das tensões no estado limite de serviço em cada um dos tempos críticos considerados tanto para o pilar original, quanto para o reforço:

- a. Pilar original antes da carga plena, data da execução do reforço e retirada da escora, basta somar as variações de tensão às tensões iniciais (σ_0)

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$$

- b. Pilar original acrescido da carga plena, somar à tensão inicial (σ_0) as tensões acrescidas (σ) e a variação de tensão ($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma + \Delta\sigma_1$$

- c. Reforço, tensão em plena carga (σ) e no tempo final somada a variação de tensão($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma + \Delta\sigma_2$$

13- Realizar as verificações do estado de serviço para esta configuração de tensões.

- a. Confirme visto no subitem 3.5.1.3, as verificações de serviço a resumem à seguinte:

$$\sigma_f < \frac{fck}{2}$$

4.1.2- FIXAÇÃO DE BARRA DE AÇO EXTERNAS

O roteiro e automatização do cálculo das tensões de serviço para pilares reforçados por fixação de barras de aço externas com resina epóxi foi feito de modo análogo ao apresentado no item anterior e será apresentado de forma idêntica. Cada valor a ser calculado será expresso nas mesmas duas etapas: 1- elucidar-se-á a variável a ser determinada e 2- equação matemática utilizada para determiná-la.

- 1- Determinar as solicitações atuantes no pilar, em duas condições:
 - a. Situação pré reforço (N_0), com a carga máxima que atuou desde a concretagem até a execução do reforço;
 - b. Situação pós reforço (N), carga máxima prevista para o uso da estrutura, nesse segundo caso é recomendado seguir a formulação da NBR2118/2014;
- 2- Cálculo das características reológicas do pilar original. Determinar o coeficiente de fluência e de envelhecimento, a retração e o módulo de elasticidade ajustado na idade da execução do reforço, na retirada do escoramento do reforço, plena carga e no tempo infinito:
- 3- Determinar o módulo de elasticidade do concreto em questão (E_c) para o concreto do pilar original por meio da seguinte equação do módulo de elasticidade tangente, pois trataremos apenas de tensões de serviço no concreto:

$$E_{c28} = 5600 * \sqrt{f_{ck}}$$

O módulo de elasticidade foi considerado constante a partir dos 28 dias, a favor da segurança.

- 4- Determinar área da seção de concreto (A_c) e em seguida a tensão (σ_0) e a deformação (ε_0) na seção crítica do pilar.

$$A_c = b \cdot h \cdot (1 - tx)$$

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{A_c}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_c}$$

Onde,

ε_0 deformação no centro do pilar;

σ_0 tensão atuante na peça quando submetida as solicitações;

A_c área de concreto da seção do pilar;

E_c módulo de elasticidade do concreto.

- 5- Determinar área homogeneizada da seção e em seguida a tensão acrescida (σ) e a deformação acrescida (ε) na seção crítica do pilar reforçado devida a carga plena.

$$A^* = b \cdot h \cdot (1 - tx) + b \cdot h \cdot (tx + tx_2) \cdot \frac{E_{aço}}{E_c}$$

$$\sigma = \frac{N - N_0}{A^*}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_c}$$

Onde,

ε deformação acrescida no centro do pilar reforçado;

σ tensão atuante na peça quando submetida as solicitações;

A^* área homogeneizada da seção do pilar reforçado;

E_c módulo de elasticidade do concreto do pilar original;

$E_{aço}$ módulo de elasticidade do aço.

- 6- Determinação das parcelas influentes nas deformações (ε) na 1-idade inicial(t_0); 2-na retirada do escoramento do reforço(t_1); 3-na eminência da plena carga(t^-_2) e na sua 4-real aplicação(t^+_2) e no 5-tempo infinito(t_∞) para o pilar original ($\varepsilon_1(t)$) e o reforço ($\varepsilon_2(t)$), considerando as seções completamente associadas;

$$\varepsilon_1(t_0) = \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_1(t_1) = \varepsilon_1(t_0) + \varepsilon_L(t_1 - t_0)$$

$$\varepsilon_1(t^-_2) = \varepsilon_1(t_1) + \varepsilon_L(t_1 - t_0) + \Delta\varepsilon_1(t_2 - t_1)$$

$$\varepsilon_1(t^+_2) = \varepsilon_1(t^-_2) + \frac{\sigma}{E_1 c}$$

$$\varepsilon_1(t_\infty) = \varepsilon_1(t^+_2) + \Delta\varepsilon_1(t_\infty - t_2)$$

$$\varepsilon_2(t_1) = 0$$

$$\varepsilon_2(t^-_2) = \Delta\varepsilon_2(t_2 - t_1)$$

$$\varepsilon_2(t^+_2) = \varepsilon_2(t^-_2) + \frac{\sigma}{E_1 c}$$

$$\varepsilon_2(t_\infty) = \varepsilon_2(t^+_2) + \Delta\varepsilon_2(t_\infty - t_2)$$

- 7- Determinar as deformações livres (ε_L) e as deformação fictícia travada pela execução do reforço (ε'_L):

$$\varepsilon_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_{cs}(t_1 - t_0)$$

$$\varepsilon'_L(t_2 - t_1) = \varepsilon_L(t_2 - t_0) - \varepsilon_L(t_1 - t_0)$$

- 8- Determinar os esforços correspondentes (N^*);

$$N^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot A^* \cdot \varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

Onde,

$\varepsilon'_L(t_2 - t_1)$ deformação fictícia travada pela execução do reforço que ocorreria no devido intervalo de tempo.

- 9- Determinar os aumentos de deformação devido aos efeitos diferidos ($\Delta\varepsilon$):

$$\Delta\varepsilon(t_2 - t_1) = \frac{\sum N^*(t_2 - t_1)}{E^*_{ref} * A^*}$$

Onde,

A^* área homogeneizada de concreto da seção do pilar reforçado;

E^*_{ref} módulo de elasticidade ajustado do concreto usado como referência na homogeneização.

- 10- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no pilar original na data da retirada da escora do reforço, plena carga e tempo infinito, respectivamente:

$$\Delta\sigma_1 = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1L})$$

- 11- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no aço do reforço do pilar nas mesmas datas:

$$\Delta\sigma_2 = E_{aço} * (\Delta\varepsilon)$$

- 12- Cálculo das tensões no estado limite de serviço em cada um dos tempos críticos considerados tanto para o pilar original, quanto para o reforço:

- a. Pilar original antes da carga plena, data da execução do reforço e retirada da escora, basta somar as variações de tensão às tensões iniciais (σ_0)

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$$

- b. Pilar original acrescido da carga plena, somar à tensão inicial (σ_0) as tensões acrescidas (σ) e a variação de tensão ($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma + \Delta\sigma_1$$

- c. Reforço, tensão em plena carga (σ) e no tempo final somada a variação de tensão ($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma + \Delta\sigma_2$$

- 13- Realizar as verificações do estado de serviço para esta configuração de tensões.

- a. Confirme visto no subitem 3.5.1.3, as verificações de serviço a resumem à seguinte:

$$\sigma_f < \frac{f_{ck}}{2}$$

4.2. FLEXÃO COMPOSTA RETA:

4.2.1- ENCAMISAMENTO COM CONCRETO ARMADO:

Tratar-se-á esse tópico analogamente ao 4.1.1-Encamisamento com concreto armado para compressão centrada, sendo assim, cada valor a ser calculado será expresso nas mesmas duas etapas dos tópicos anteriores.

Devido à semelhança entre os cálculos necessários para verificação do estado limite de serviço na condição de flexão composta reta com a compressão centrada, diversos dos procedimentos para a obtenção dos valores finais são idênticos, portanto, estes serão apenas citados novamente, sem a necessidade de explicitar a formulação.

- 1- Determinar as solicitações atuantes no pilar. Devem ser fornecidos à planilha os valores os esforços atuantes em duas condições:
 - a. Situação pré reforço (N_0 e M_0), com a carga máxima que atuou desde a concretagem até a execução do reforço;
 - b. Situação pós reforço (N e M), carga máxima prevista para o uso da estrutura, nesse segundo caso é recomendado seguir a formulação da NBR2118/2014;
- 2- Cálculo das características reológicas do pilar original e do reforço. Determinar o coeficiente de fluência e de envelhecimento, a retração e o módulo de elasticidade ajustado na idade da execução do reforço, na retirada do escoramento do reforço e no tempo infinito:
- 3- Determinar o módulo de elasticidade do concreto em questão (E_c) para o concreto do pilar original e para o concreto do reforço.
- 4- Determinar área da seção de concreto e a área homogeneizada da seção e em seguida a tensão (σ_0) e a deformação (ε_0) na seção crítica do pilar original.
- 5- Determinar o momento de inércia (I^*) homogeneizado da seção e em seguida a tensão de borda (σ_{0b}) e a deformação (ε_{0b} e ψ_0) máxima de borda na seção crítica do pilar original:

$$I_1^* = \frac{b \cdot h^3}{12} + \frac{E_{aço}}{E_1 c} (tx * b \cdot h \frac{h}{(b+h) * (h-2c)} * \frac{(h-2c)^3}{12} + tx * b \cdot h \frac{b}{(b+h)} * (h-2c))$$

$$\sigma_{0b} = \frac{N_0}{A_1 c} + \frac{M_0 * z}{I_1^*}$$

$$\varepsilon_{0b} = \frac{\sigma_{0b}}{E_1 c}$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{0b} + \psi_0 \cdot z \therefore \psi_0 = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{0b}}{z}$$

Onde,

- ψ_0 curvatura inicial;
- ε_{0b} deformação na borda;
- σ_{0b} tensão atuante na borda;
- A_{1c} área de concreto da seção do pilar;
- I_1^* momento de inércia homogeneizado da seção do pilar;
- z distância a partir do centro de gravidade até a borda;
- E_{1c} módulo de elasticidade do concreto;
- $E_{aço}$ módulo de elasticidade do aço.

- 6- Determinar área homogeneizada da seção e em seguida a tensão acrescida (σ) e a deformação acrescida (ε) na seção crítica do pilar reforçado devida a carga plena.
- 7- Determinar o momento de inércia (I_2^*) homogeneizado da seção e em seguida a tensão (σ_b) e a deformação (ε_b e ψ) máxima de borda na seção crítica do pilar original, porém com reforço já executado e submetido a carga plena:

$$I_2^* = \frac{b_r \cdot h_r^3}{12} - \frac{b \cdot h^3}{12} + \alpha_2(tx * b_r \cdot h_r \frac{h_r}{(b_r + h_r) * (h_r - 2c)} * \frac{(h_r - 2c)^3}{12} + tx$$

$$* b_r \cdot h_r \frac{b_r}{(b_r + h_r)} * (h_r - 2c)$$

$$\sigma_b = \frac{N - N_0}{A_{1c} + A_{2c}} + \frac{(M - M_0) * z}{I_2^* + I_1^*}$$

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_2 c}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \psi \cdot z \therefore \psi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{z}$$

Onde,

- ψ curvatura do pilar reforçado;
 - ε_b deformação acrescida na borda do pilar original;
 - σ_b tensão atuante na borda do pilar original;
 - I_2^* momento de inércia homogeneizado da seção do reforço;
 - z distância a partir do centro de gravidade até a borda do pilar original;
- 8- Determinação das parcelas influentes nas deformações (ε) na 1-idade inicial(t_0); 2- na retirada do escoramento do reforço(t_1); 3-na eminência da plena carga(t^-_2) e na sua 4-real aplicação(t^+_2) e no 5-tempo infinito(t_∞) para o pilar original ($\varepsilon_1(t)$) e o reforço ($\varepsilon_2(t)$), considerando as seções completamente associadas;

- 9- Determinar as deformações e curvaturas fictícias (ε_L e ψ_L) e a deformação fictícia travada pela execução do reforço (ε'_L) e sua curvatura correspondente (ψ'_L):

$$\varepsilon_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_{cs}(t_1 - t_0)$$

$$\psi_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \psi_0$$

$$\varepsilon'_L(t_2 - t_1) = \varepsilon_L(t_2 - t_0) - \varepsilon_L(t_1 - t_0)$$

$$\psi'_L(t_2 - t_1) = \psi_L(t_2 - t_0) - \psi_L(t_1 - t_0)$$

- 10- Determinar os esforços correspondentes (N^* e M^*);

$$N^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot A^* \cdot \varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

$$M^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot I^* \cdot \psi'_L(t_2 - t_1)$$

Onde,

$\varepsilon'_L(t_2 - t_1)$ deformação fictícia travada pela execução do reforço que ocorreria no devido intervalo de tempo;

$\psi'_L(t_2 - t_1)$ curvatura correspondente à deformação fictícia travada que ocorreria no devido intervalo de tempo.

- 11- Determinar os aumentos de deformação devido aos efeitos diferidos ($\Delta\varepsilon$):

$$\Delta\varepsilon(t_2 - t_1) = \frac{\sum N^*(t_2 - t_1)}{E^*_{ref} \cdot A^*} + \frac{\sum M^*(t_2 - t_1) \cdot z}{E^*_{ref} \cdot I^*}$$

Onde,

A^* área homogeneizada de concreto da seção do pilar reforçado;

I^* momento de inércia homogeneizada da seção do pilar reforçado;

E^*_{ref} módulo de elasticidade ajustado do concreto usado como referência na homogeneização.

- 12- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no pilar original no centro de gravidade e na borda na data da retirada da escora do reforço, plena carga e tempo infinito, respectivamente:

$$\Delta\sigma_1 = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1L})$$

$$\Delta\sigma_{b1} = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1Lb}), \text{ onde : } \varepsilon'_{1Lb} = \varepsilon'_{1L} + \psi'_L \cdot z$$

- 13- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no reforço do pilar nas mesmas datas:

$$\Delta\sigma_2 = E^*(t) \cdot (\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{2L})$$

- 14- Cálculo das tensões no estado limite de serviço em cada um dos tempos críticos considerados tanto para o pilar original, quanto para o reforço:

- a. Pilar original antes da carga plena, data da execução do reforço e retirada da escora, basta somar as variações de tensão às tensões iniciais (σ_0)

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_{b0} + \Delta\sigma_{b1}$$

- b. Pilar original acrescido da carga plena, somar à tensão inicial (σ_0) as tensões acrescidas (σ) e a variação de tensão ($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma + \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_{b0} + \sigma_b + \Delta\sigma_{b1}$$

- c. Reforço, tensão em plena carga (σ) e no tempo final somada a variação de tensão($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma + \Delta\sigma_2$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_b + \Delta\sigma_{b2}$$

15- Realizar as verificações do estado de serviço para esta configuração de tensões.

- a. Confirme visto no subitem 3.5.1.3, as verificações de serviço a resumem à seguinte:

$$\sigma_{bf} < \frac{fck}{2}$$

4.2.2- FIXAÇÃO DE BARRAS DE AÇO EXTERNAS:

O roteiro e automatização do cálculo das tensões de serviço para pilares reforçados por fixação de barras de aço externas com resina epóxi foi feito de modo análogo ao apresentado no item anterior e será apresentado de forma idêntica. Sendo assim, cada valor a ser calculado será expresso nas mesmas duas etapas dos tópicos anteriores, exceto os procedimentos já elucidados anteriormente, esses serão apenas citados.

- 1- Determinar as solicitações atuantes no pilar. Devem ser fornecidos à planilha os valores os esforços atuantes em duas condições:
 - a. Situação pré reforço (N_0 e M_0), com a carga máxima que atuou desde a concretagem até a execução do reforço;
 - b. Situação pós reforço (N e M), carga máxima prevista para o uso da estrutura, nesse segundo caso é recomendado seguir a formulação da NBR2118/2014;
- 2- Cálculo das características reológicas do pilar original. Determinar o coeficiente de fluência e de envelhecimento, a retração e o módulo de elasticidade ajustado na idade da execução do reforço, na retirada do escoramento do reforço e no tempo infinito:
- 3- Determinar o módulo de elasticidade do concreto em questão (E_c) para o concreto do pilar original.
- 4- Determinar área da seção de concreto e a área homogeneizada da seção e em seguida a tensão (σ_0) e a deformação (ε_0) na seção crítica do pilar original.
- 5- Determinar o momento de inércia (I^*) homogeneizado da seção e em seguida a tensão de borda (σ_{0b}) e a deformação (ε_{0b} e ψ_0) máxima de borda na seção crítica do pilar original:

$$I_1^* = \frac{b \cdot h^3}{12} + \frac{E_{aço}}{E_1 c} (tx * b \cdot h \frac{h}{(b+h) * (h-2c)} * \frac{(h-2c)^3}{12} + tx * b \cdot h \frac{b}{(b+h)} * (h-2c))$$

$$\sigma_{0b} = \frac{N_0}{A_1 c} + \frac{M_0 * z}{I_1^*}$$

$$\varepsilon_{0b} = \frac{\sigma_{0b}}{E_1 c}$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{0b} + \psi_0 \cdot z \therefore \psi_0 = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{0b}}{z}$$

Onde,

ψ_0 curvatura inicial;

ε_{0b} deformação na borda;

σ_{0b} tensão atuante na borda;

$A_1 c$ área de concreto da seção do pilar;

I_1^* momento de inércia homogeneizado da seção do pilar;

z distância a partir do centro de gravidade até a borda;

E_{1c} módulo de elasticidade do concreto;

$E_{aço}$ módulo de elasticidade do aço.

6- Determinar área homogeneizada da seção e em seguida a tensão acrescida (σ) e a deformação acrescida (ε) na seção crítica do pilar reforçado devida a carga plena.

7- Determinar o momento de inércia (I_2^*) homogeneizado da seção e em seguida a tensão (σ_b) e a deformação (ε_b e ψ) máxima de borda na seção crítica do pilar original, porém com reforço já executado e submetido a carga plena:

$$I_2^* = \frac{b \cdot h^3}{12} + \frac{E_{1c}}{E_{aço}} (tx * b_r \cdot h_r \frac{h_r}{(b_r + h_r) * (h_r - 2c)} * \frac{(h_r - 2c)^3}{12} + tx * b_r \cdot h_r \frac{b_r}{(b_r + h_r)} * (h_r - 2c)$$

$$\sigma_b = \frac{N - N_0}{A_{1c} + A_{2c}} + \frac{(M - M_0) * z}{I_2^* + I_1^*}$$

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_{2c}}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \psi \cdot z \therefore \psi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{z}$$

Onde,

ψ curvatura do pilar reforçado;

ε_b deformação acrescida na borda do pilar original;

σ_b tensão atuante na borda do pilar original;

I_2^* momento de inércia homogeneizado da seção do reforço;

z distância a partir do centro de gravidade até a borda do pilar original;

8- Determinação das parcelas influentes nas deformações (ε) na 1-idade inicial(t_0); 2- na retirada do escoramento do reforço(t_1); 3-na eminência da plena carga(t^-_2) e na sua 4-real aplicação(t^+_2) e no 5-tempo infinito(t_∞) para o pilar original ($\varepsilon_1(t)$) e o reforço ($\varepsilon_2(t)$), considerando as seções completamente associadas;

9- Determinar as deformações e curvaturas fictícias (ε_L e ψ_L) e a deformação fictícia travada pela execução do reforço (ε'_L) e sua curvatura correspondente (ψ'_L):

$$\varepsilon_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_{cs}(t_1 - t_0)$$

$$\psi_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \psi_0$$

$$\varepsilon'_L(t_2 - t_1) = \varepsilon_L(t_2 - t_0) - \varepsilon_L(t_1 - t_0)$$

$$\psi'_L(t_2 - t_1) = \psi_L(t_2 - t_0) - \psi_L(t_1 - t_0)$$

10- Determinar os esforços correspondentes (N^* e M^*);

$$N^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot A^* \cdot \varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

$$M^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot I^* \cdot \psi'_L(t_2 - t_1)$$

Onde,

$\varepsilon'_L(t_2 - t_1)$ deformação fictícia travada pela execução do reforço que ocorreria no devido intervalo de tempo;

$\psi'_L(t_2 - t_1)$ curvatura correspondente à deformação fictícia travada que ocorreria no devido intervalo de tempo.

11- Determinar os aumentos de deformação devido aos efeitos diferidos ($\Delta\varepsilon$):

$$\Delta\varepsilon(t_2 - t_1) = \frac{\sum N^*(t_2 - t_1)}{E^*_{ref} * A^*} + \frac{\sum M^*(t_2 - t_1) * z}{E^*_{ref} * I^*}$$

Onde,

A^* área homogeneizada de concreto da seção do pilar reforçado;

I^* momento de inércia homogeneizada da seção do pilar reforçado;

E^*_{ref} módulo de elasticidade ajustado do concreto usado como referência na homogeneização.

12- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no pilar original no centro de gravidade e na borda na data da retirada da escora do reforço, plena carga e tempo infinito, respectivamente:

$$\Delta\sigma_1 = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1L})$$

$$\Delta\sigma_{b1} = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1Lb}), \text{ onde : } \varepsilon'_{1Lb} = \varepsilon'_{1L} + \psi'_L \cdot z$$

13- Cálculo da variação de tensão ($\Delta\sigma$) no reforço do pilar nas mesmas datas:

$$\Delta\sigma_2 = E^*(t) * (\Delta\varepsilon)$$

14- Cálculo das tensões no estado limite de serviço em cada um dos tempos críticos considerados tanto para o pilar original, quanto para o reforço:

b. Pilar original antes da carga plena, data da execução do reforço e retirada da escora, basta somar as variações de tensão às tensões iniciais (σ_0)

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_{b0} + \Delta\sigma_{b1}$$

c. Pilar original acrescido da carga plena, somar à tensão inicial (σ_0) as tensões acrescidas (σ) e a variação de tensão ($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma + \Delta\sigma_1$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_{b0} + \sigma_b + \Delta\sigma_{b1}$$

- d. Reforço, tensão em plena carga (σ) e no tempo final somada a variação de tensão($\Delta\sigma$):

$$\sigma_f = \sigma + \Delta\sigma_2$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_b + \Delta\sigma_{b2}$$

15- Realizar as verificações do estado de serviço para esta configuração de tensões.

- e. Confirme visto no subitem 3.5.1.3, as verificações de serviço a resumem à seguinte:

$$\sigma_{bf} < \frac{fck}{2}$$

5. ESTUDO DE CASO:

Conforme anunciado na introdução, finalizar-se-á este estudo com a verificação de um reforço de pilar, calculado exclusivamente para o estado limite último, no estado limite de serviço por meio do *software* desenvolvido.

O pilar escolhido demandou reforço por resistência abaixo da especificada em projeto e a opção de reforço foi por encamisamento com acréscimo de seção. A resistência de projeto era de 35 MPa aos 28 dias, porém, através de extração de testemunho motivado por resultados de resistência aquém do esperado dos copos de prova moldados na data da concretagem, concluiu-se que a resistência efetiva do concreto do pilar era de 23,7 MPa.

A seção de 35x140 cm foi armada inicialmente com 14 barras de $\phi 12,5$ e em seguida reforçada, tendo por final 45x150 cm com acréscimo de 14 barras de $\phi 16$ com f_{ck} de 40MPa.

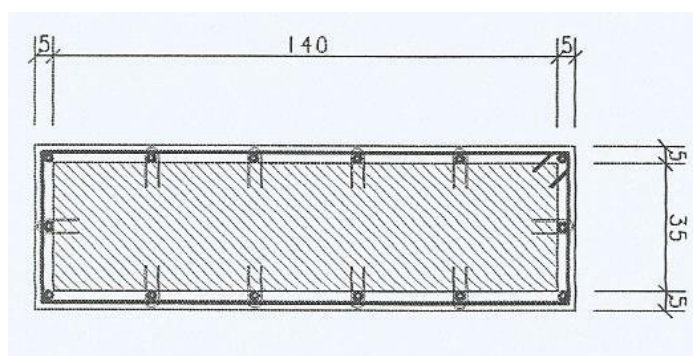


Figura 5.1- Seção acrescida do pilar

Os esforços de cálculo obtidos através do *software* TQS levaram em consideração todas as exigências da norma brasileira e foram os seguintes:

- $N_d = 3200$ kN

- $M_d = 145,1$ kNm

Para realizar as verificações em serviço, os esforços foram minorados pelo coeficiente de $\gamma_c 1,4$ de majoração de esforços, obtendo assim:

- $N = 2285$ kN

- $M = 103,6$ kNm

Admitiu-se também que a carga atuante antes do reforço ser executado era da ordem de 15% da final:

- $N_o = 343$ kN

- $M_o = 15,5$ kNm

As informações cronológicas foram obtidas por estimativas feitas com auxílio de pessoas envolvidas no projeto e as demais informações necessárias foram adotados valores recorrentes para

essa tipologia de obra. Preenchendo-se a planilha com as características do pilar e informações cronológicas, obteve-se:

Tabela 5-1 Características do pilar e informações cronológicas.

| Pilar original | | |
|--|------------|--------|
| fck28(MPa) | 35 | |
| fck do ensaio(MPa) | 23,7 | |
| Data do ensaio | 25/08/2014 | |
| dimensões (cm) | 140 | 35 |
| cobrimento (cm) | 2,5 | |
| data da concretagem | 25/04/2014 | |
| data do fim da cura | 28/04/2014 | |
| data da retirada da escora | 25/05/2014 | |
| tipo de cimento | CP II | |
| temperatura média (°C) | 22 | |
| umidade relativa | 70 | |
| Armação | bitola | barras |
| | 12,5 | 14 |
| Normal de serviço no ato do reforço (kN) | 343 | |
| Momento de serviço no ato do reforço (kNm) | 15,5 | |

| Reforço | | |
|-------------------------------|------------|--------|
| fck28(MPa) | 40 | |
| dimensões totais (cm) | 150 | 45 |
| data da carga plena | 15/09/2015 | |
| data da concretagem | 15/07/2014 | |
| data do fim da cura | 30/07/2014 | |
| data da retirada da escora | 15/08/2014 | |
| tipo de cimento | CP II | |
| Armação | bitola | barras |
| | 16,0 | 14 |
| Normal de serviço máx. (kN) | 2285 | |
| Momento de serviço máx. (kNm) | 103,6 | |

A tensão máxima permitida em serviço para esse pilar seria de aproximadamente 12MPa, metade do fck e, após a transferência ocorrida, a tensão final foi de 5,05 MPa na borda interna do pilar reforçado. Esse valor baixo era esperado pois fazendo uma simples verificação do valor adimensional da força normal no pilar sem o reforço, temos:

$$v = \frac{Nd}{f_{cd} * A_c}$$

$$v = 0,267$$

Visando resultados mais significativos, adota-se um multiplicado de cargas de 3,5, aproximando o valor adimensional da unidade. Com isso teremos novos valores de ruptura e serviço, porém, deixou de ser uma análise de caso real:

- Nd=11200 kN
- Md=145,1 kNm
- N=8000 kN
- M=103,6 kNm
- No=1200 kN

$$-M_o = 15,5 \text{ kNm}$$

Para esses novos valores, a tensão máxima obtida foi de 13,37MPa na borda interna do pilar reforçado, mesma região da primeira análise. Nesse caso, com uma carga mais significativa, a tensão superou o máximo de 12MPa permitido, demandando um novo dimensionamento.

Portanto, pode-se constatar que o reforço de pilar dimensionado exclusivamente para o estado limite último nem sempre atende às exigências de serviço, principalmente em casos nos quais o valor adimensional da normal se aproxime do valor unitário.

6. CONCLUSÃO:

Ao termino do projeto final conclui-se que o método adotado para o cálculo dos esforços atuantes no sistema pilar reforço atende as principais recomendações para análise de estruturas compostas por materiais de propriedades diferentes feitas pela FIB.

Evidencia-se a relevância do estudo proposto por abordar uma questão de pesquisa indagada por Souza e Ripper, 1998:

“Finalmente, há uma questão básica a ser respondida, e que depende de resultados a serem obtidos através de pesquisas. Imagine-se um pilar em que a sua capacidade resistente esteja perfeitamente ajustada à solicitação que lhe é imposta, e seja este pilar reforçado por encamisamento simples (sem cintamento), onde todas as técnicas garantidoras de uma perfeita aderência entre o novo concreto e o concreto já existente foram observadas. Neste caso, e após algum tempo decorrido, conseguir-se-á uma seção praticamente homogênea, especialmente se na dosagem do novo concreto tiver sido observada a necessidade de lhe conferir propriedades mecânicas e elásticas muito próximas das do concreto existente no pilar original. Teoricamente, após o reforço ter sido executado com os cuidados já mencionados, se não houver nenhuma variação da carga na estrutura (o que é praticamente impossível) esta seção complementada não entrará em serviço. ”

Exclui-se das verificações de serviço o estado limite de deformação e de fissuração por não se aplicar a pilares e restringe-se a verificação da tensão máxima de serviço. Verificação provinda da interpretação da norma, porém, não exigida explicitamente pela mesma. Fato constado pelo desconhecimento de alguns engenheiros ao seu respeito.

Fica claro também que o estudo proposto não foi abordado na sua plenitude, pois foi deixado de fora a flexão composta oblíqua e, nos casos de encamisamento aumento de seção, não foi considerada a transferência de tensão do concreto para o aço. Essa transferência não é desprezível para pilares com taxas de armação acima de 1%, como se pode constatar nos casos de fixação de barras de aço externas, nos quais esse efeito foi quantificado. Tal hipótese seria definitiva na não-aplicabilidade da planilha, contudo, a grande maioria dos pilares não possuem taxas de armação superior a 1%, caso contrário a verificação de transferência se faria necessária também em pilares sem reforço.

BIBLIOGRAFIA:

KOPRNA. Milan; FAVRE, Renaud “Efeitos Diferidos”05/1986, tradução livre Chaves.
de R. Martins07/2014

TEATINI, João Carlos de S. C. “Estruturas de Concreto Armado”, 2ª ed. Brasília UnB,
2013;

SOUZA, Vicente; RIPPER, Thomas. “Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de
Concreto”, 1ª ed. São Paulo Pini, 1998;

NBR 6118:2014. “Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento”, 3ª ed, Rio de
Janeiro ABNT, 2014;

NBR 6120:1980. “Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações”, 1ª ed, Rio de
Janeiro ABNT, 1980;

NORMA DNIT 082/2006 – ES “Furos no concreto para ancoragem de armaduras –
Especificação de serviço”

FIB, Bulletin 17. “Managmente, MaintenanceandStrengthening os Concrete
Structures”,2002;

HELENE, Paulo. “Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto”,2ª
ed. São Paulo Pini, 1992;

HELENE, Paulo; PEREIRA, Fernanda. “Manual de Rehabilitación de Estrutucturas de
Hormigón”, 1ª ed. São Paulo, 2003;

ANEXO A

Tabelas para cálculo de combinações de cargas:

Tabela A.1 Valores do coeficiente γ_f (NBR 6118:2014)

| Combinações de ações | Ações | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------|-----|------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|---|
| | Permanentes (g) | | Variáveis (q) | | Protensão (p) | | Recalques de apoio e retração | |
| | D | F | G | T | D | F | D | F |
| Normais | 1,4 ^a | 1,0 | 1,4 | 1,2 | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 0 |
| Especiais ou de construção | 1,3 | 1,0 | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 0,9 | 1,2 | 0 |
| Excepcionais | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 0 | 1,2 | 0,9 | 0 | 0 |

onde
 D é desfavorável, F é favorável, G representa as cargas variáveis em geral e T é a temperatura.

^a Para as cargas permanentes de pequena variabilidade, como o peso próprio das estruturas, especialmente as pré-moldadas, esse coeficiente pode ser reduzido para 1,3.

Tabela A.2 Valores do coeficiente γ_{f2} (NBR 6118:2014)

| Ações | | γ_{f2} | | |
|---------------------------------------|--|---------------|------------|----------|
| | | ψ_0 | ψ_1^a | ψ_2 |
| Cargas acidentais de edifícios | Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b | 0,5 | 0,4 | 0,3 |
| | Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ^c | 0,7 | 0,6 | 0,4 |
| | Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens | 0,8 | 0,7 | 0,6 |
| Vento | Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral | 0,6 | 0,3 | 0 |
| Temperatura | Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local | 0,6 | 0,5 | 0,3 |

^a Para os valores de ψ_1 relativos às pontes e principalmente para os problemas de fadiga, ver Seção 23.
^b Edifícios residenciais.
^c Edifícios comerciais, de escritórios, estações e edifícios públicos.

Tabela A.3 Combinações últimas (NBR 6118:2014)

| Combinações últimas (ELU) | Descrição | Cálculo das solicitações |
|--|---|---|
| Normais | Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado ^a | $F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$ |
| | Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido | Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores $P_{k\max}$ e $P_{k\min}$ para a força desfavorável e favorável, respectivamente, conforme definido na Seção 9 |
| | Perda do equilíbrio como corpo rígido | $S(F_{sd}) \geq S(F_{nd})$ $F_{sd} = \gamma_{gs} G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s, \min}$, onde: $Q_{nk} = Q_{1k} + \sum \psi_{0j} Q_{jk}$ |
| Especiais ou de construção ^b | | $F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + \gamma_q (F_{q1k} + \sum \psi_{0j} F_{qjk}) + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$ |
| Excepcionais ^b | | $F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_{eg} F_{egk} + F_{q1exc} + \gamma_q \sum \psi_{0j} F_{qjk} + \gamma_{eq} \psi_{0e} F_{eqk}$ |
| <p>onde</p> <p>F_d é o valor de cálculo das ações para combinação última;</p> <p>F_{gk} representa as ações permanentes diretas;</p> <p>F_{ek} representa as ações indiretas permanentes como a retração F_{egk} e variáveis como a temperatura F_{eqk};</p> <p>F_{qk} representa as ações variáveis diretas das quais F_{q1k} é escolhida principal;</p> <p>$\gamma_g, \gamma_{eg}, \gamma_q, \gamma_{eq}$ ver Tabela 11.1;</p> <p>ψ_{0j}, ψ_{0e} ver Tabela 11.2;</p> <p>F_{sd} representa as ações estabilizantes;</p> <p>F_{nd} representa as ações não estabilizantes;</p> <p>G_{sk} é o valor característico da ação permanente estabilizante;</p> <p>R_d é o esforço resistente considerado estabilizante, quando houver;</p> <p>G_{nk} é o valor característico da ação permanente instabilizante;</p> <p>$Q_{nk} = Q_{1k} + \sum_{j=2}^m \psi_{0j} Q_{jk}$;</p> <p>$Q_{nk}$ é o valor característico das ações variáveis instabilizantes;</p> <p>Q_{1k} é o valor característico da ação variável instabilizante considerada principal;</p> <p>ψ_{0j} e Q_{jk} são as demais ações variáveis instabilizantes, consideradas com seu valor reduzido;</p> <p>$Q_{s, \min}$ é o valor característico mínimo da ação variável estabilizante que acompanha obrigatoriamente uma ação variável instabilizante.</p> <p>^a No caso geral, devem ser consideradas inclusive combinações onde o efeito favorável das cargas permanentes seja reduzido pela consideração de $\gamma_g = 1,0$. No caso de estruturas usuais de edifícios, essas combinações que consideram γ_g reduzido (1,0) não precisam ser consideradas.</p> <p>^b Quando F_{q1k} ou F_{q1exc} atuarem em tempo muito pequeno ou tiverem probabilidade de ocorrência muito baixa, ψ_{0j} pode ser substituído por ψ_{2j}. Este pode ser o caso para ações sísmicas e situação de incêndio.</p> | | |

Tabela A.4 Combinações de serviço (NBR 6118:2014)

| Combinações de serviço (ELS) | Descrição | Cálculo das solicitações |
|---|--|---|
| Combinações quase permanentes de serviço (CQP) | Nas combinações quase permanentes de serviço, todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$ | $F_{d,ser} = \Sigma F_{gi,k} + \Sigma \psi_2 F_{qj,k}$ |
| Combinações frequentes de serviço (CF) | Nas combinações frequentes de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor frequente $\psi_1 F_{q1k}$ e todas as demais ações variáveis são tomadas com seus valores quase permanentes $\psi_2 F_{qk}$ | $F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + \psi_1 F_{q1k} + \Sigma \psi_2 F_{qjk}$ |
| Combinações raras de serviço (CR) | Nas combinações raras de serviço, a ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor característico F_{q1k} e todas as demais ações são tomadas com seus valores frequentes $\psi_1 F_{qk}$ | $F_{d,ser} = \Sigma F_{gik} + F_{q1k} + \Sigma \psi_1 F_{qjk}$ |
| <p>onde</p> <p>$F_{d,ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço;</p> <p>F_{q1k} é o valor característico das ações variáveis principais diretas;</p> <p>ψ_1 é o fator de redução de combinação frequente para ELS;</p> <p>ψ_2 é o fator de redução de combinação quase permanente para ELS.</p> | | |

Tabela A.5 Valores da fluência e da retração em função da velocidade de endurecimento do cimento (NBR 6118:2014)

| Cimento Portland (CP) | α | |
|--|----------|----------|
| | Fluência | Retração |
| De endurecimento lento (CP III e CP IV, todas as classes de resistência) | 1 | 1 |
| De endurecimento normal (CP I e CP II, todas as classes de resistência) | 2 | |
| De endurecimento rápido (CP V-ARI) | 3 | |
| Legenda: CP I e CP I-S – Cimento Portland comum CP II-E, CP II-F e CP II-Z – Cimento Portland composto CP III – Cimento Portland de alto forno CP IV – Cimento Portland pozolânico CP V-ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial RS – Cimento Portland resistente a sulfatos (propriedade específica de alguns dos tipos de cimento citados) | | |

ANEXO B

Formulação da planilha de cálculo:

4.1.1 Compressão centrada com reforço por encamisamento com concreto:

Inicialmente devem ser fornecidos dos dados do caso a ser avaliado, são eles:

Tabela B1 Dados de entrada do pilar original.

| | B | C | D |
|----|--|------------|--------|
| 2 | Pilar original | | |
| 3 | fck28(MPa) | 35 | |
| 4 | fck do ensaio(MPa) | 30,5 | |
| 5 | Data do ensaio | 25/08/2015 | |
| 6 | dimensões (cm) | 40 | 40 |
| 7 | cobrimento (cm) | 2,5 | |
| 8 | data da concretagem | 25/06/2015 | |
| 9 | data do fim da cura | 28/06/2015 | |
| 10 | data da retirada da escora | 05/07/2015 | |
| 11 | tipo de cimento | CP II | |
| 12 | temperatura média (°C) | 22 | |
| 13 | umidade relativa | 70 | |
| 14 | Armação | bitola | barras |
| 15 | | 12,5 | 20 |
| 16 | Normal de serviço no ato do reforço (kN) | 500 | |
| 17 | | | |
| 18 | Momento de serviço no ato do reforço (kNm) | 30 | |
| 19 | | | |

Tabela B2 Dados de entrada do reforço.

| | G | H | I |
|----|-------------------------------|------------|--------|
| 2 | Reforço | | |
| 3 | fck28(MPa) | 40 | |
| 4 | dimensões totais (cm) | 65 | 65 |
| 5 | data da carga plena | 15/09/2015 | |
| 6 | data da concretagem | 15/07/2015 | |
| 7 | data do fim da cura | 01/08/2015 | |
| 8 | data da retirada da escora | 15/08/2015 | |
| 9 | tipo de cimento | CP III | |
| 10 | Armação | bitola | barras |
| 11 | | 12,5 | 20 |
| 12 | Normal de serviço máx. (kN) | 6000 | |
| 13 | | | |
| 14 | Momento de serviço máx. (kNm) | 60 | |
| 15 | | | |

| M | N | O | P | Q | R | S | T |
|----|------------------|---|----------------|---------------------|----------|----------------|------------------------|
| 56 | | | Pilar original | | | | |
| 57 | | | Fluência | | | | |
| 58 | | Dados | | execução do reforço | | | |
| 59 | 59 f3= | 174,93 Coeficiente de fluência rápida | | 0,00 | | tempo infinito | tempo infinito carga 2 |
| 60 | 60 f2= | 108,80 Coeficiente de deformação lenta irreversível | | 4,17 | 0,00 | 4,17 | 4,04 |
| 61 | 61 f= | 42,67 Coeficiente relativo a unidade | | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| 62 | 62 f0= | 21,33 Coeficiente relativo a espessura f0 | | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,02 |
| 63 | 63 a1= | 2,00 Coeficiente relativo a deformação lenta irreversível | | 0,09 | 0,22 | 0,28 | 0,66 |
| 64 | 64 s= | 0,25 Coeficiente de deformação lenta reversível | | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| 65 | 65 lambda= | 1,45 Coeficiente relativo a deformação lenta reversível | | 0,45 | 0,68 | 0,78 | 0,99 |
| 66 | 66 h f= | 0,29 Coeficiente de fluência | | 1,00 | 1,18 | 1,48 | 2,64 |
| 67 | 67 h frc maximo= | 1,60 Coeficiente de envelhecimento | | 0,59 | 0,60 | 0,62 | 0,70 |
| 68 | | | Retração | | | | |
| 69 | | Dados | | execução do reforço | | | |
| 70 | 70 f3= | 87,47 Coeficiente dependente da unidade | | 0,00 | | tempo infinito | |
| 71 | 71 f2= | 54,40 Coeficiente dependente da espessura | | 1,55 | 1,55 | 1,55 | 1,55 |
| 72 | 72 f= | 21,33 Coeficiente relativo a retração f0 | | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 73 | 73 f0= | 3,20 Coeficiente relativo a retração f | | 0,04 | 0,14 | 0,25 | 1,00 |
| 74 | 74 s= | 0,25 Retração | | 3,68E-06 | 1,27E-04 | 3,12E-04 | 9,49E-04 |

| M | N | Q | P | Q | R | S |
|----|-------|---|-----------|-------------------------------|------------|----------------|
| 77 | | | Período | | | |
| 78 | | | Fluência | | | |
| | Dados | | | | | |
| 80 | 81 | Coefficientes | | retirada de escora do reforço | capa plena | tempo infinito |
| 81 | 82 | Coefficiente de fluência rápida | | | | |
| 82 | 83 | Coefficiente de deformação lenta irreversível | | | | |
| 83 | 84 | Coefficiente relativo a unidade | | | | |
| 84 | 85 | Coefficiente relativo a espessura inicial | | | | |
| 85 | 86 | Coefficiente de deformação lenta irreversível | | | | |
| 86 | 87 | Coefficiente de deformação lenta reversível | | | | |
| 87 | 88 | Coefficiente relativo a deformação lenta reversível | | | | |
| 88 | 89 | Coefficiente de fluência | | | | |
| 89 | 90 | Coefficiente de envelhecimento | | | | |
| | | | Permeação | | | |
| 90 | 91 | Coefficientes | | retirada de escora do reforço | capa plena | tempo infinito |
| 91 | 92 | Coefficiente dependente da unidade | | | | |
| 92 | 93 | Coefficiente dependente da espessura | | | | |
| 93 | 94 | Coefficiente relativo a retração (f) | | | | |
| 94 | 95 | Coefficiente relativo a retração (f) | | | | |
| 95 | | Retração | | | | |

44

Cálculo das características reológicas do pilar original e do reforço. Determinar o coeficiente de fluência e de envelhecimento, a retração e o módulo de elasticidade ajustado na idade da execução do reforço, na retirada do escoramento do reforço e no tempo infinito:

- a. Coeficiente de fluência é dado pela seguinte formula, descrita no anexo A da NBR6118/2014:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_{f\infty}[\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_{d\infty}\beta_d$$

Pilar original, data da execução do reforço, retirada da escora, plena carga e tempo final relativo a carga inicial e relativo a carga plena, respectivamente:

$$P66 = SE(P59+P60*P63+P64*P65<1;1;P59+P60*P63+P64*P65)$$

$$Q66 = SE(Q59+Q60*Q63+Q64*Q65<1;1;Q59+Q60*Q63+Q64*Q65)$$

$$R66 = SE(R59+R60*R63+R64*R65<1;1;R59+R60*R63+R64*R65)$$

$$S66 = SE(S59+S60*S63+S64*S65<1;1;S59+S60*S63+S64*S65)$$

$$T66 = SE(T59+T60*T63+T64*T65<1;1;T59+T60*T63+T64*T65)$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$Q87 = SE(Q80+Q81*Q84+Q85*Q86<1;1;Q80+Q81*Q84+Q85*Q86)$$

$$R87 = SE(R80+R81*R84+R85*R86<1;1;R80+R81*R84+R85*R86)$$

$$S87 = SE(S80+S81*S84+S85*S86<1;1;S80+S81*S84+S85*S86)$$

A condicional de vermelha é imposta para limitar por baixo o coeficiente de fluência a 1.

Onde:

Coeficiente de fluência rápida:

$$\varphi_a = 0,8 * (1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{\infty})}), \text{ para } f_{ck} \text{ menor que } 45 \text{ MPa};$$

$$\varphi_a = 1,4 * (1 - \frac{f_c(t_0)}{f_c(t_{\infty})}), \text{ para } f_{ck} \text{ maior que } 45 \text{ MPa};$$

Pela hipótese proposta no roteiro de que o f_{ck} se mantém constante no tempo igual ao de 28 dias, pode-se desprezar esse fator, exceto no caso de cargas muito próximas a data da concretagem, o que é muito raro no caso de pilares.

Coeficiente de deformação lenta irreversível:

$$\varphi_{f\infty} = \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}, \text{ para } f_{ck} \text{ menor que } 45 \text{ MPa};$$

$$\varphi_{f\infty} = 0,45 \cdot \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}, \text{ para } f_{ck} \text{ maior que } 45 \text{ MPa};$$

Pilar original, data da execução do reforço, retirada da escora, plena carga e tempo final relativo a carga inicial e relativo a carga plena, respectivamente:

$$P60=SE(E4="";SE(C3<45;P61*P62;0,45*(P61*P62));SE(E4<45;P61*P62;0,45*(P61*P62)))$$

$$Q60=SE(E4="";SE(C3<45;Q61*Q62;0,45*(Q61*Q62));SE(E4<45;Q61*Q62;0,45*(Q61*Q62)))$$

$$R60=SE(E4="";SE(C3<45;R61*R62;0,45*(R61*R62));SE(E4<45;R61*R62;0,45*(R61*R62)))$$

$$S60=SE(E4="";SE(C3<45;S61*S62;0,45*(S61*S62));SE(E4<45;S61*S62;0,45*(S61*S62)))$$

$$T60=SE(F4="";SE(D3<45;T61*T62;0,45*(T61*T62));SE(F4<45;T61*T62;0,45*(T61*T62)))$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$Q81 = SE(H3<45;Q82*Q83;0,45*(Q82*Q83))$$

$$R81 = SE(H3<45;R82*R83;0,45*(R82*R83))$$

$$S81 = SE(H3<45;S82*S83;0,45*(S82*S83))$$

Onde:

$$\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035U$$

$$P61=Q61=R61=S61=T61=Q82=R82=S82=4,45-0,035*C13$$

U: Umidade relativa do local (C13;[%])

$$\varphi_{2c} = \frac{42+H_{fic}}{20+H_{fic}}$$

Pilar original:

$$P62=Q62=R62=S62=(42+N66)/(20+N66)$$

$$T62=(42+1,6)/(20+1,6)$$

Reforço:

$$Q83=R83=S83=(42+N86)/(20+N86)$$

H_{fic} :Espessura fictícia: $H_{fic} = \gamma \frac{2A_c}{u_{ar}}$, limitado entre 0,05 e 1,6:

Pilar original:

$$N66=SE(N65*2*D6/100*C6/100/(2*(C6+D6)/100)<0,05;0,05;SE(N65*2*D6/100*C6/100/(2*(C6+D6)/100)>1,6;1,6;N65*2*D6/100*C6/100/(2*(C6+D6)/100)))$$

Reforço:

$$N86=SE(N85*2*I4/100*H4/100/(2*(H4+I4)/100)<0,05;0,05;SE(N85*2*I4/100*H4/100/(2*(H4+I4)/100)>1,6;1,6;N85*2*I4/100*H4/100/(2*(H4+I4)/100)))$$

No Cálculo da espessura fictícia as quatro faces do pilar foram consideradas expostas ao meio, o que é razoável para a maioria dos casos de pilares, exceto no caso após o reforço, no qual foi adotada a espessura máxima de 1,6.

γ : Coeficiente dependente da umidade relativa do ambiente;

$$\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1 \cdot U)$$

$$N_{65}=N_{85}=\text{EXP}(-7,8+0,1 \cdot C_{13})+1$$

Coeficiente relativo a deformação lenta irreversível:

$$\beta_f(t) = \frac{t^2 + At + B}{t^2 + Ct + D}$$

$$\beta_f(t) - \beta_f(t_0)$$

Pilar original, data da execução do reforço, retirada da escora, plena carga e tempo final relativo a carga inicial e relativo a carga plena, respectivamente:

$$P_{63} = (N_{61}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{61} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{61}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{61} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)) - ((N_{62}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{62} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{62}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{62} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)))$$

$$Q_{63} = (N_{60}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{60} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{60}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{60} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)) - ((N_{62}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{62} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{62}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{62} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)))$$

$$R_{63} = (N_{59}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{59} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{59}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{59} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)) - ((N_{62}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{62} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{62}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{62} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)))$$

$$S_{63} = (9999^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot 9999 + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (9999^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot 9999 + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)) - ((N_{62}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{62} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{62}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{62} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)))$$

$$T_{63} = (9999^2 + (42 \cdot N_{67}^3 - 350 \cdot N_{67}^2 + 588 \cdot N_{67} + 113) \cdot 9999 + (768 \cdot N_{67}^3 - 3060 \cdot N_{67}^2 + 3234 \cdot N_{67} - 23)) / (9999^2 + (-200 \cdot N_{67}^3 + 13 \cdot N_{67}^2 + 1090 \cdot N_{67} + 183) \cdot 9999 + (7579 \cdot N_{67}^3 - 31916 \cdot N_{67}^2 + 35343 \cdot N_{67} + 1931)) - ((N_{62}^2 + (42 \cdot N_{66}^3 - 350 \cdot N_{66}^2 + 588 \cdot N_{66} + 113) \cdot N_{62} + (768 \cdot N_{66}^3 - 3060 \cdot N_{66}^2 + 3234 \cdot N_{66} - 23)) / (N_{62}^2 + (-200 \cdot N_{66}^3 + 13 \cdot N_{66}^2 + 1090 \cdot N_{66} + 183) \cdot N_{62} + (7579 \cdot N_{66}^3 - 31916 \cdot N_{66}^2 + 35343 \cdot N_{66} + 1931)))$$

$$67^3 - 31916 * N67^2 + 35343 * N67 + 1931)) - ((N59^2 + (42 * N67^3 - 350 * N67^2 + 588 * N67 + 113) * N59 + (768 * N67^3 - 3060 * N67^2 + 3234 * N67 - 23)) / (N59^2 + (-200 * N67^3 + 13 * N67^2 + 1090 * N67 + 183) * N59 + (7579 * N67^3 - 31916 * N67^2 + 35343 * N67 + 1931)))$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$Q84=0$$

$$R84=(N80^2+(42*N86^3-350*N86^2+588*N86+113)*N80+(768*N86^3-3060*N86^2+3234*N86-23))/(N80^2+(-200*N86^3+13*N86^2+1090*N86+183)*N80+(7579*N86^3-31916*N86^2+35343*N86+1931))-(N82^2+(42*N86^3-350*N86^2+588*N86+113)*N82+(768*N86^3-3060*N86^2+3234*N86-23))/(N82^2+(-200*N86^3+13*N86^2+1090*N86+183)*N82+(7579*N86^3-31916*N86^2+35343*N86+1931))$$

$$S84=(9999^2+(42*N86^3-350*N86^2+588*N86+113)*9999+(768*N86^3-3060*N86^2+3234*N86-23))/(9999^2+(-200*N86^3+13*N86^2+1090*N86+183)*9999+(7579*N86^3-31916*N86^2+35343*N86+1931))-(N80^2+(42*N86^3-350*N86^2+588*N86+113)*N80+(768*N86^3-3060*N86^2+3234*N86-23))/(N80^2+(-200*N86^3+13*N86^2+1090*N86+183)*N80+(7579*N86^3-31916*N86^2+35343*N86+1931))$$

Onde:

$$A = 42h^3 - 350h^2 + 588h + 113$$

$$B = 768h^3 - 3060h^2 + 3234h - 23$$

$$C = -200h^3 + 13h^2 + 1090h + 183$$

$$D = 7579h^3 - 31916h^2 + 35343h + 1931$$

$$t = \alpha \sum \frac{T_i + 10}{30} \Delta t_{ef}$$

Pilar original, data da retirada da escora do pilar original, execução do reforço, retirada da escora, plena carga, respectivamente:

$$N62=(C10-C8)*N63*(C12+10)/30$$

$$N61=(H6-C8)*N63*(C12+10)/30$$

$$N60=(H8-C8)*N63*(C12+10)/30$$

$$N59=(H5-C8)*N63*(C12+10)/30$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$N82=(H8-H6)*N83*(C12+10)/30$$

$$N81=(H5-H6)*N83*(C12+10)/30$$

Onde:

T_i : temperatura média diária (C12;[C°]);

Δt_{ef} : período no qual se deseja obter o tempo fictício;

α : coeficiente dependente da velocidade do endurecimento do concreto dado pela Tabela A5.

Pilar original:

$$N63 = \text{PROCV}(C11; \text{Plan3!B1:D6}; 2; \text{FALSO})$$

Reforço:

$$N83 = \text{PROCV}(H9; \text{Plan3!B1:D6}; 2; \text{FALSO})$$

Coeficiente de deformação lenta reversível, valor final:

$$\varphi_{d\infty} = 0,4$$

$$P64 = Q64 = R64 = S64 = T64 = Q85 = R85 = S85 = 0,4$$

Coeficiente relativo a deformação lenta reversível em função do tempo:

$$\beta_d = \frac{t - t_0 + 20}{t - t_0 + 70}$$

$$\beta_f(t) - \beta_f(t_0)$$

Pilar original, data da retirada da escora do pilar original, execução do reforço, retirada da escora, plena carga, respectivamente:

$$P65 = (N61 - N62 + 20) / (N61 - N62 + 70)$$

$$Q65 = (N60 - N62 + 20) / (N60 - N62 + 70)$$

$$R65 = (N59 - N62 + 20) / (N59 - N62 + 70)$$

$$S65 = (9999 - N62 + 20) / (9999 - N62 + 70)$$

$$T65 = (9999 - N59 + 20) / (9999 - N59 + 70)$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$Q86 = 0$$

$$R86 = (N80 - N82 + 20) / (N80 - N82 + 70)$$

$$S86 = (9999 - N80 + 20) / (9999 - N80 + 70)$$

b. Coeficiente de envelhecimento, conforme descrito no item 3.3:

$$\chi = \frac{1}{1 - e^{-\varphi}} - \frac{1}{\varphi}$$

Pilar original, data da retirada da escora do pilar original, execução do reforço, retirada da escora, plena carga, respectivamente:

$$P67 = (1 / (1 - \text{EXP}(-P66))) - (1 / P66)$$

$$Q67 = (1 / (1 - \text{EXP}(-Q66))) - (1 / Q66)$$

$$R67 = (1 / (1 - \text{EXP}(-R66))) - (1 / R66)$$

$$S67 = (1 / (1 - \text{EXP}(-S66))) - (1 / S66)$$

$$T67 = (1 / (1 - \text{EXP}(-T66))) - (1 / T66)$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$Q88=(1/(1-EXP(-Q87)))-(1/Q87)$$

$$R88=(1/(1-EXP(-R87)))-(1/R87)$$

$$S88=(1/(1-EXP(-S87)))-(1/S87)$$

c. Retração da peça:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$$

Pilar original, data da retirada da execução do reforço, retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$P74=P70*P71*(P73-P72)$$

$$Q74=Q70*Q71*(Q73-Q72)$$

$$R74=R70*R71*(R73-R72)$$

$$S74=S70*S71*(S73-S72)$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final, respectivamente:

$$Q95=Q91*Q92*(Q94-Q93)$$

$$R95=R91*R92*(R94-R93)$$

$$S95=S91*S92*(S94-S93)$$

Onde:

$\varepsilon_{cs\infty}$: valor final da retração:

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{s1} * \varepsilon_{s2}$$

ε_{s1} : coeficiente depende da umidade relativa do ambiente e da consistência do concreto

$$\varepsilon_{s1} * 10^4 = -8,09 + \frac{U}{15} - \frac{U^2}{2284} + \frac{U^3}{133765} - \frac{U^4}{7608150}$$

Equação valida para umidade relativa entre 40% e 90% e abatimento do concreto de 5cm a 9cm.

$$P70=Q70=R70=S70=Q91=R91=S91=-(-8,09+(C13/15)-(C13^2/2284)+(C13^3/133765)-(C13^4/7608150))/10000$$

ε_{s2} : coeficiente dependente da espessura fictícia:

$$\varepsilon_{s2} = \frac{33+2H_{fic}}{20,8+3H_{fic}}$$

Pilar original:

$$P71=Q71=R71=S71=(33+2*N66)/(20,8+3*N66)$$

Reforço:

$$Q92=R92=S92=(33+2*N86)/(20,8+3*N86)$$

$\beta_s(t)$: coeficiente relativo a retração no tempo

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E}$$

$$A = 40$$

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8$$

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7$$

$$D = -75h^3 + 585h^2 + 496h - 6,8$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8$$

$$t = \sum \frac{T_{i+10}}{30} \Delta t_{ef}$$

Pilar original:

Para t_0 (fim da cura):

$$N73 = (C9 - C8) * (C12 + 10) / 30$$

$\beta_s(t_0)$:

$$P72 = Q72 = R72 = S72 = ((N73/100)^3 + 40 * (N73/100)^2 + (116 * N66^3 - 282 * N66^2 + 220 * N66 - 4,8) * (N73/100)) / ((N73/100)^3 + (2,5 * N66^3 - 8,8 * N66 + 40,7) * (N73/100)^2 + (-75 * N66^3 + 585 * N66^2 + 496 * N66 - 6,8) + (-169 * N66^4 + 88 * N66^3 + 584 * N66^2 - 39 * N66 + 0,8))$$

Para t (execução do reforço, retirada da escora, e plena carga, respectivamente):

$$N72 = (H6 - C8) * (C12 + 10) / 30$$

$$N71 = (H8 - C8) * (C12 + 10) / 30$$

$$N70 = (H5 - C8) * (C12 + 10) / 30$$

$\beta_s(t)$:

$$P73 = ((N72/100)^3 + 40 * (N72/100)^2 + (116 * N66^3 - 282 * N66^2 + 220 * N66 - 4,8) * (N72/100)) / ((N72/100)^3 + (2,5 * N66^3 - 8,8 * N66 + 40,7) * (N72/100)^2 + (-75 * N66^3 + 585 * N66^2 + 496 * N66 - 6,8) + (-169 * N66^4 + 88 * N66^3 + 584 * N66^2 - 39 * N66 + 0,8))$$

$$Q73 = ((N71/100)^3 + 40 * (N71/100)^2 + (116 * N66^3 - 282 * N66^2 + 220 * N66 - 4,8) * (N71/100)) / ((N71/100)^3 + (2,5 * N66^3 - 8,8 * N66 + 40,7) * (N71/100)^2 + (-75 * N66^3 + 585 * N66^2 + 496 * N66 - 6,8) + (-169 * N66^4 + 88 * N66^3 + 584 * N66^2 - 39 * N66 + 0,8))$$

$$R73 = ((N70/100)^3 + 40 * (N70/100)^2 + (116 * N66^3 - 282 * N66^2 + 220 * N66 - 4,8) * (N70/100)) / ((N70/100)^3 + (2,5 * N66^3 - 8,8 * N66 + 40,7) * (N70/100)^2 + (-75 * N66^3 + 585 * N66^2 + 496 * N66 - 6,8) + (-169 * N66^4 + 88 * N66^3 + 584 * N66^2 - 39 * N66 + 0,8))$$

$$S73 = SE(((9999/100)^3 + 40 * (9999/100)^2 + (116 * N66^3 - 282 * N66^2 + 220 * N66 - 4,8) * (9999/100)) / ((9999/100)^3 + (2,5 * N66^3 - 8,8 * N66 + 40,7) * (9999/100)^2 + (-75$$

$$*N66^3+585*N66^2+496*N66-6,8)+(-169*N66^4+88*N66^3+584*N66^2-39*N66+0,8))>1;1;((9999/100)^3+40*(9999/100)^2+(116*N66^3-282*N66^2+220*N66-4,8)*(9999/100))/((9999/100)^3+(2,5*N66^3-8,8*N66+40,7)*(9999/100)^2+(-75*N66^3+585*N66^2+496*N66-6,8)+(-169*N66^4+88*N66^3+584*N66^2-39*N66+0,8)))$$

Reforço:

Para t_0 (fim da cura):

$$N93=(H7-H6)*(C12+10)/30$$

$\beta_s(t_0)$:

$$Q93=R93=S93=((N93/100)^3+40*(N93/100)^2+(116*N86^3-282*N86^2+220*N86-4,8)*(N93/100))/((N93/100)^3+(2,5*N86^3-8,8*N86+40,7)*(N93/100)^2+(-75*N86^3+585*N86^2+496*N86-6,8)+(-169*N86^4+88*N86^3+584*N86^2-39*N86+0,8)))$$

Para t (retirada da escora e plena carga, respectivamente):

$$N92=(H8-H6)*(C12+10)/30$$

$$N91=(H5-H6)*(C12+10)/30$$

$\beta_s(t)$:

$$Q94=((N92/100)^3+40*(N92/100)^2+(116*N86^3-282*N86^2+220*N86-4,8)*(N92/100))/((N92/100)^3+(2,5*N86^3-8,8*N86+40,7)*(N92/100)^2+(-75*N86^3+585*N86^2+496*N86-6,8)+(-169*N86^4+88*N86^3+584*N86^2-39*N86+0,8)))$$

$$R94=((N91/100)^3+40*(N91/100)^2+(116*N86^3-282*N86^2+220*N86-4,8)*(N91/100))/((N91/100)^3+(2,5*N86^3-8,8*N86+40,7)*(N91/100)^2+(-75*N86^3+585*N86^2+496*N86-6,8)+(-169*N86^4+88*N86^3+584*N86^2-39*N86+0,8)))$$

$$S94=((9999/100)^3+40*(9999/100)^2+(116*N86^3-282*N86^2+220*N86-4,8)*(9999/100))/((9999/100)^3+(2,5*N86^3-8,8*N86+40,7)*(9999/100)^2+(-75*N86^3+585*N86^2+496*N86-6,8)+(-169*N86^4+88*N86^3+584*N86^2-39*N86+0,8)))$$

d. Módulo de elasticidade ajustado, conforme descrito no item 3.3:

$$E^*(t, t_0) = \frac{E_0}{1 + \chi(t, t_0) \cdot \varphi(t, t_0)}$$

Pilar original, data da execução do reforço, retirada da escora, plena carga e tempo final:

$$N6=N5/(1+(P67*P66))$$

$$N7=N5/(1+(Q67*Q66))$$

$$N8=N5/(1+(R67*R66))$$

$$N9=N5/(1+(S67*S66))$$

Reforço, data da retirada da escora, plena carga e tempo final:

$$Q6=Q5/(1+Q88*Q87)$$

$$Q7=Q5/(1+R88*R87)$$

$$Q8=Q5/(1+S88*S87)$$

2- Então parte-se para a caracterização da seção do pilar e do reforço:

| M | N | O | P | Q | R |
|---|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|---|
| | Pilar original | | | Reforço | |
| 2 | Dados | seção de concreto | Dados | seção de concreto | |
| 3 | Fck | 30,50 | Fck | 40,00 | |
| 4 | Ec | 30,93 | Ec | 35,42 | |
| 5 | Ec*(data do reforço) | 19,55 | Ec*(retirada da escora do reforço) | 22,39 | |
| 6 | Ec*(retirada da escora do reforço) | 18,19 | Ec*(plena carga) | 22,39 | |
| 7 | Ec*(plena carga) | 16,14 | Ec*(final) | 12,47 | |
| 8 | Ec*(final) | 9,40 | tx de aço | 0,01 | |
| 9 | tx de aço | 0,02 | | | |

Figura B 2 Tabela de caracterização da seção, pilar original e reforço

1- Módulo de elasticidade dos concretos do pilar e do reforço:

a. Pilar original:

$$N5=SE(C4="";SE(C3<45;(5600*C3^{0,5}/1000)*((N4/C3)^{0,5});(5600*C3^{0,5}/1000)*((N4/C3)^{0,3});SE(C4<45;(5600*C4^{0,5}/1000)*((N4/C4)^{0,5});(5600*C4^{0,5}/1000)*((N4/C4)^{0,3})))$$

b. Reforço:

$$Q5=5600*H3^{0,5}/1000$$

2- Área de concreto e momento de inércia:

a. Pilar original

$$Ac1 = b \cdot h \cdot (1 - tx)$$

$$O5 = C6 * D6 * (1 - N10) / 10000$$

$$I_1^* = \frac{b \cdot h^3}{12} + \frac{E_{aço}}{E_1 c} (tx * b \cdot h \frac{h}{(b + h) * (h - 2c)} * \frac{(h - 2c)^3}{12} + tx * b \cdot h \frac{b}{(b + h)} * (h - 2c))$$

$$O7=((D6*C6^3)/12+((N10*C6*D6*D6/((C6+D6)*(D6-2*C7)))*(D6-2*C7)^3/12+(C6/(C6+D6)*D6*C6*N10*(D6/2-C7)^2)*(210/N5))/1000000000$$

b. Reforço

$$Ac2 = (b_r \cdot h_r - b \cdot h) \cdot (1 - tx')$$

$$R5=(H4*I4)*(1-Q9)/10000-O5$$

$$I_2^* = \frac{b_r \cdot h_r^3}{12} - \frac{b \cdot h^3}{12} + \alpha_2 (tx * b_r \cdot h_r \frac{h_r}{(b_r + h_r) * (h_r - 2c)} * \frac{(h_r - 2c)^3}{12} + tx * b_r \cdot h_r \frac{b_r}{(b_r + h_r)} * (h_r - 2c))$$

$$R7=((((H4*I4^3)/12)-((C6*D6^3)/12)+(((Q9-N10)*H4*I4*I4/((H4+I4)*(I4-2*C7))))*(I4-2*C7)^3/12+(H4/(H4+I4)*I4*H4*(Q9-N10)*(I4/2-C7)^2)*(210/Q5))/1000000000$$

3- Estado de tensões e deformações do pilar e do reforço:

| M | N | Q | P | Q | R | S | T |
|----|----------------------------|----------|----------------|-----------------------|--------------------------|-------------|------------|
| | | Imediata | ato do reforço | ato da retirada escoa | carga plena (eminencial) | carga plena | final |
| 18 | | | | | | | |
| 19 | Pilar original | | | | | | |
| 20 | Deformação= | | 5,26E-05 | 5,26E-05 | 5,26E-05 | 3,20E-04 | 3,20E-04 |
| 21 | Deformação na borda= | | 5,88E-05 | 5,88E-05 | 5,88E-05 | 4,57E-04 | 7,84E-04 |
| 22 | Deformação livre= | | 1,63E-04 | 1,63E-04 | 1,26E-03 | 1,26E-03 | 1,18E-03 |
| 23 | Curvatura= | | 9,14E-06 | 9,14E-06 | 9,14E-06 | 1,94E-04 | 1,94E-04 |
| 24 | Def. agular livre= | | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 8,51E-06 | 8,51E-06 | 1,23E-04 |
| 25 | Deformação travada= | | | | 1,005E-03 | 0,00E+00 | -7,173E-05 |
| 26 | Def. agular travada= | | | | 8,509E-06 | 0,00E+00 | 1,143E-04 |
| 27 | Tensão no C.G. (Mpa) = | | 143 | 143 | 143 | 10,91 | 10,91 |
| 28 | Tensão na borda= | | 160 | 160 | 160 | 12,46 | 12,46 |
| 29 | Normal correspondente= | | | | 5924 | 5924 | -338 |
| 30 | Momento correspondente= | | | | 8,2 | 8,2 | 88,6 |
| 31 | Transferência cg (Mpa)= | | | | -0,96 | 0,00 | 0,00 |
| 32 | Transferência borda (Mpa)= | | | | 0,49 | 9,96 | 11,47 |
| 33 | Tensão final cg= | | 143 | 143 | 143 | 11,50 | 13,02 |
| 34 | Tensão final borda= | | 160 | 160 | 160 | 11,50 | 13,02 |
| 35 | Deformação= | | | | 0,00E+00 | 2,68E-04 | 2,68E-04 |
| 36 | Deformação na borda= | | | | | 4,02E-04 | 6,71E-04 |
| 37 | Deformação na borda int. = | | | | | 3,98E-04 | 6,30E-04 |
| 38 | Deformação travada= | | | | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,27E-04 |
| 39 | Curvatura= | | | | | 1,85E-04 | 3,09E-04 |
| 40 | Def. agular travada= | | | | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,24E-04 |
| 41 | Tensão no C.G. (Mpa) = | | | | | 9,48 | 9,48 |
| 42 | Tensão na borda= | | | | | 10,96 | 10,96 |
| 43 | Tensão na borda int. = | | | | | 10,85 | 10,85 |
| 44 | Normal correspondente= | | | | 2367 | 2367 | 992 |
| 45 | Momento correspondente= | | | | 0 | 0 | 17,0 |
| 46 | DELTA N' (kN)= | | | | 8231,54 | 8231,54 | 654,25 |
| 47 | DELTA M' (kNm)= | | | | 8,2 | 8,2 | 105,6 |
| 48 | DELTA deformação cg= | | | | 9,27E-04 | 9,27E-04 | 8,44E-05 |
| 49 | DELTA def. borda= | | | | 9,32E-04 | 9,32E-04 | 1,68E-04 |
| 50 | DELTA def. borda interna= | | | | 9,32E-04 | 9,32E-04 | 1,68E-04 |
| 51 | Transferência cg (Mpa)= | | | | 2,62 | 2,62 | -4,17 |
| 52 | Transferência borda (Mpa)= | | | | 2,71 | 2,71 | -4,28 |
| 53 | Tensão final cg= | | | | 2,62 | 12,10 | 7,93 |
| 54 | Tensão final borda= | | | | 2,71 | 13,67 | 9,39 |

Figura B 3 Tabela de estado de deformação e tensão, pilar original e reforço

1- Tensões e deformações no centro de gravidade:

$$\sigma_0 = \frac{N}{Ac1}$$

$$O26=P26=Q26=R26=C16/1000/O5$$

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_{ref}}$$

$$O19=P19=Q19=R19=O26/N5/1000$$

$$\sigma = \frac{N}{Ac}$$

$$S40=T40=(H12-C16)/1000/(R5+O5)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_c}$$

$$S34=T34 =S40/Q5/1000$$

$$\sigma + \sigma_0$$

$$S26=T26=O26+S40$$

2- Tensões e deformações na borda e curvatura:

$$\sigma_{0b} = \frac{N_0}{A_1 c} + \frac{M_0 * z}{I_1^*}$$

$$O27=P27=Q27=R27=C16/1000/O5+C18/1000*(C6/2-C7)/100/O7$$

$$\varepsilon_{0b} = \frac{\sigma_{0b}}{E_1 c}$$

$$O20=P20=Q20=R20=O27/N5/1000$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{0b} + \psi_0 \cdot z \therefore \psi_0 = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{0b}}{z}$$

$$O22=(O20-O19)/((C6/2-C7)/100)$$

Borda interna ($z = \frac{b}{2} - \text{cobrimento}$):

$$\sigma_b = \frac{N - N_0}{A_1 c + A_2 c} + \frac{(M - M_0) * z}{I_2^* + I_1^*}$$

$$S42=(H12-C16)/1000/(R5+O5)+(H14-C18)/1000*(C6/2-C7)/100/(R7+O7)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_2 c}$$

$$S36 =S42/N5/1000$$

Borda externa ($z = \frac{b_r}{2} - \text{cobrimento}$):

$$\sigma_b = \frac{N - N_0}{A_1 c + A_2 c} + \frac{(M - M_0) * z}{I_2^* + I_1^*}$$

$$S41 =(H12-C16)/1000/(R5+O5)+(H14-C18)/1000*(H4/2-C7)/100/(R7+O7)$$

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_2 c}$$

$$S35 = S41/N5/1000$$

$$\varepsilon = \varepsilon_b + \psi \cdot z \therefore \psi = \frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{z}$$

$$S38 = (S35 - S34) / ((H4/2 - C7)/100)$$

3- Deformação e deformação angular fictícia livre:

Pilar original, data da execução do reforço, retirada da escora, plena carga e tempo final:

$$\varepsilon_L(t_1 - t_0) = (1 - \varphi(t_1 - t_0)) \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_{cs}(t_1 - t_0)$$

$$P21 = O19 * P66 + P74 - P19$$

$$Q21 = O19 * Q66 + Q74 - Q19$$

$$R21 = S21 = O19 * R66 + R74 - R19$$

$$T21 = O19 * S66 + S74 + S34 * T66 - T19$$

$$\psi_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \psi_0$$

$$P23 = O22 * P66 - P22$$

$$Q23 = O22 * Q66 - Q22$$

$$R23 = S23 = O22 * R66 - R22$$

$$T23 = O22 * S66 + S38 * T66 - T22$$

Reforço, data da plena carga e tempo final, respectivamente:

$$\varepsilon_L(t_1 - t_0) = (1 - \varphi(t_1 - t_0)) \cdot \varepsilon_0 + \varepsilon_{cs}(t_1 - t_0)$$

$$R37 = S37 = R95 \text{ (apenas retração)}$$

$$T37 = S34 * S87 + S95 - T34 - R37$$

$$\psi_L(t_1 - t_0) = \varphi(t_1 - t_0) \cdot \psi_0$$

$$R39 = S39 = 0$$

$$T39 = S38 * S87 - T38$$

4- Deformação e deformação angular travadas e normais e momentos correspondentes:

Pilar original, data da plena carga e tempo final:

$$\varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

$$R24 = R21 - Q21$$

$$T24 = T21 - S21$$

$$\psi'_L(t_2 - t_1)$$

$$R25 = R23 - Q23$$

$$T25 = T23 - S23$$

$$N^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot A^* \cdot \varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

$$R28=S28=N8*O5*R24*1000000$$

$$T28=N9*O5*T24*1000000$$

$$M^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot I^* \cdot \psi'_L(t_2 - t_1)$$

$$R29=S29=N8*O7*R25*1000000$$

$$T29=N9*O7*T25*1000000$$

Reforço, data da plena carga e tempo final:

$$\varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

$$\psi'_L(t_2 - t_1)$$

Todas as deformações são travadas, portanto basta iguala-las a deformação livre.

$$N^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot A^* \cdot \varepsilon'_L(t_2 - t_1)$$

$$R43=S43=Q7*R5*R37*1000000$$

$$T43=Q8*R5*T37*1000000$$

$$M^*(t_2 - t_1) = E^*_{ref} \cdot I^* \cdot \psi'_L(t_2 - t_1)$$

$$R44=S44=0$$

$$T44=Q8*R7*T39*1000000$$

- 5- Somatório dos esforços correspondentes e os aumentos de deformação devido aos efeitos diferidos ($\Delta\varepsilon$):

Data da plena carga e tempo final:

$$\sum N^*(t_2 - t_1)$$

$$R45=S45=R43+R28$$

$$T45=T43+T28$$

$$\sum M^*(t_2 - t_1)$$

$$R46=S46=R29+R44$$

$$T46=T29+T44$$

$$\Delta\varepsilon(t_2 - t_1) = \frac{\sum N^*(t_2 - t_1)}{E^*_{ref} \cdot A^*} + \frac{\sum M^*(t_2 - t_1) \cdot z}{E^*_{ref} \cdot I^*}$$

Centro de gravidade ($z = 0$):

$$R47=S47=R45/1000/((Q7/N8*R5+O5)*N8)/1000$$

$$T47=T45/1000/((Q8/N9*R5+O5)*N9)/1000$$

Borda interna ($z = \frac{b}{2} - \text{cobrimento}$):

$$R49=S49=R45/1000/(((Q7/N8*R5+O5)*N8)/1000+R46/1000/(((Q7/N8*R7+O7)*N8)/1000*(C6/2-C7)/100)$$

$$T49=T45/1000/(((Q8/N9*R5+O5)*N9)/1000+T46/1000/(((Q8/N9*R7+O7)*N9)/1000*(C6/2-C7)/100)$$

Borda externa ($z = \frac{b_r}{2} - \text{cobrimento}$):

$$R48=S48=R45/1000/(((Q7/N8*R5+O5)*N8)/1000+R46/1000/(((Q7/N8*R7+O7)*N8)/1000*(H4/2-C7)/100)$$

$$T48=T45/1000/(((Q8/N9*R5+O5)*N9)/1000+T46/1000/(((Q8/N9*R7+O7)*N9)/1000*(H4/2-C7)/100)$$

6- Transferência de tensão e valores finais:

Pilar original, data da plena carga e tempo final:

Centro de gravidade ($z = 0$):

$$\Delta\sigma_1 = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{1L})$$

$$R30=N8*(R47-R24)*1000$$

$$T30=N9*(T47-T24)*1000$$

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma_1$$

$$R32=R26+R30$$

$$\sigma_f = \sigma_0 + \sigma + \Delta\sigma_1$$

$$S32=S26+S30+R30$$

$$T32=T26+R30+T30$$

Borda interna ($z = \frac{b}{2} - \text{cobrimento}$):

$$\Delta\sigma_{b1} = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{b1L})$$

$$R31=N8*(R49-(R24+R25*(C6/2-C7)/100))*1000$$

$$T31=N9*(T49-(T24+T25*(C6/2-C7)/100))*1000$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_{b0} + \Delta\sigma_{b1}$$

$$R33=R27+R31$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_{b0} + \sigma_b + \Delta\sigma_{b1}$$

$$S33=S27+S31+R31$$

$$T33=T27+R31+T31$$

Reforço, data da plena carga e tempo final:

Centro de gravidade ($z = 0$):

$$\Delta\sigma_2 = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_L)$$

$$R50 = Q7*(R47-R37)*1000$$

$$T50 = Q8 * (T47 - T37) * 1000$$

$$\sigma_f = \Delta\sigma_2$$

$$R52 = R50$$

$$\sigma_f = \sigma + \Delta\sigma_2$$

$$S52 = S40 + S50$$

$$T52 = S52 + T50$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_b + \Delta\sigma_{b2}$$

Borda externa ($z = \frac{b_r}{2} - \text{cobrimento}$):

$$\Delta\sigma_{b2} = E^*(t, t_0)(\Delta\varepsilon - \varepsilon'_{b2L})$$

$$R51 = Q7 * (R48 - (R37 + R39 * (H4/2 - C7)/100)) * 1000$$

$$T51 = Q8 * (T48 - (T37 + T39 * (H4/2 - C7)/100)) * 1000$$

$$\sigma_{bf} = \Delta\sigma_{b2}$$

$$R53 = R51$$

$$\sigma_{bf} = \sigma_b + \Delta\sigma_{b2}$$

$$S53 = S41 + S51$$

$$T53 = S53 + T51$$

A verificação de tensão máxima foi tratada por uma formatação condicional na planilha que altera a cor das células para vermelho, indicando que tal condição não foi atendida e que se deve redimensionar o sistema pilar reforço.